



КОСМІЧНА НАУКА І ТЕХНОЛОГІЯ

НАЦІОНАЛЬНА
АКАДЕМІЯ
НАУК УКРАЇНИ

Том 28
6(139)
2022

SPACE SCIENCE AND TECHNOLOGY

НАУКОВО-ПРАКТИЧНИЙ ЖУРНАЛ ✦ ЗАСНОВАНО В ЛЮТОМУ 1995 р. ✦ ВИХОДИТЬ 6 РАЗІВ НА РІК ✦ КИЇВ

ЗМІСТ

Космічна й атмосферна фізика

Лізунов Г. В., Корепанов В. Є., Луценюк А. А., П'янкova О. В., Федоров О. П. Космічний проєкт «Іоносат-Мікро»: готовність до реалізації 3

Захаров І. Г., Черногор Л. Ф. Глобальні та локальні ефекти сейсмічної активності в іоносфері 12

Федоренко А. К., Крючков Є. І., Черемних О. К., Жук І. Т. Хвильові збурення атмосфери у просторово неоднорідній течії 25

Науки про життя в космосі

Orlovska I., Podolich O., Kukhareenko O., Zubova G., Reva O., di Cesare A., Góes-Neto A., Azevedo V., Barh D., de Vera J.-P., Kozuyrovska N. The conceptual approach to the use of postbiotics based on bacterial membrane nanovesicles for prophylaxis of astronauts' health disorders. 34

Пастухов А. О., Крисанова Н. В., Позднякова Н. Г., Борисов А. А., Сівко Р. В., Назарова А. Г., Калиновська Л. М., Борисова Т. О. Розроблення підходів нейропротекції при довготривалих космічних місіях. . . 52

CONTENTS

Space and Atmospheric Physics

Lizunov G. V., Korepanov V. Ye., Lukenyuk A. A., Piankova O. V., Fedorov O. P. Space project "Ionosat-Micro": readiness for implementation 3

Zakharov I. G., Chernogor L. F. Global and local effects of seismic activity in the ionosphere 12

Fedorenko A. K., Kryuchkov E. I., Cheremnykh O. K., Zhuk I. T. Wave disturbances of the atmosphere in spatially inhomogeneous flow. 25

Space Life Sciences

Orlovska I., Podolich O., Kukhareenko O., Zubova G., Reva O., di Cesare A., Góes-Neto A., Azevedo V., Barh D., de Vera J.-P., Kozuyrovska N. The conceptual approach to the use of postbiotics based on bacterial membrane nanovesicles for prophylaxis of astronauts' health disorders. 34

Pastukhov A. O., Krisanova N. V., Pozdnyakova N. G., Borysov A. A., Sivko R. V., Nazarova A. G., Kalynovska L. M., Borisova T. O. Development of neuroprotection approaches for long-term space missions. 52

Соціогуманітарні аспекти космічних досліджень		Social Sciences in Space Exploration	
<i>Малишева Н. Р., Гурова А. М.</i> Довгострокова сталість космічної діяльності: нові виклики перед міжнародним і національним космічним правом	63	<i>Malysheva N. R., Hurova A. M.</i> Long-term sustainability of space activities: New challenges for international and national space law	63
Історія космічних досліджень		History of Space Research	
<i>Пилипчук О. Я., Стрелко О. Г., Пилипчук О. О. С. А.</i> Подолінський в енергетичному трактуванні еволюції природи і суспільства	74	<i>Pylypchuk O. Ya., Strelko O. H., Pylypchuk O. O. S. A.</i> Podolynskiyi in the energetic interpretation of the evolution of nature and society	74
<i>«Дослідження Землі з космосу було сутністю його наукового життя»</i> — слово пам'яті про проф. Вадима Івановича Лялька, академіка НАН України	85	<i>«Exploring the Earth from space was the essence of his scientific life»</i> — a word of memory for Prof. Vadym I. Lyalko, Academician of the National Academy of Sciences of Ukraine	85
Авторський покажчик	87	Index	87

На першій сторінці обкладинки — Загальний вигляд КА «Мікросат-М» (див. статтю Лізунова Г. В. та ін. «Космічний проєкт «Іоносат-Мікро»: готовність до реалізації», С. 3—11)

Журнал «Космічна наука і технологія» включено до переліку наукових фахових видань України, в яких публікуються результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата фізико-математичних, технічних, біологічних, геологічних та юридичних наук

Відповідальний секретар редакції О.В. КЛИМЕНКО

Адреса редакції: 01030, Київ-30, вул. Володимирська, 54
тел./факс (044) 526-47-63, ел. пошта: reda@mao.kiev.ua
Веб-сайт: space-scitechnjournal.org.ua

Свідоцтво про реєстрацію КВ № 1232 від 2 лютого 1995 р.
Перереєстровано Міністерством юстиції України 21.11.2018 р.,
Свідоцтво серія КВ № 23700-13540 ПР

Підписано до друку 08.12.2022. Формат 84 × 108/16. Гарн. Ньютон.
Ум. друк. арк. 9,45. Обл.-вид. арк. 9,92. Тираж 50 прим. Зам. № 6798.

Видавець і виготовлювач ВД «Академперіодика» НАН України
вул. Терещенківська, 4, м. Київ, 01024

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру суб'єктів видавничої справи серії ДК № 544 від 27.07.2001 р.

<https://doi.org/10.15407/knit2022.06.003>

УДК 629.783, 550.388

Г. В. ЛІЗУНОВ¹, зав. лаб., канд. фіз.-мат. наук

В. Є. КОРЕПАНОВ², заст. дир., д-р техн. наук

А. А. ЛУКЕНЮК², дир., д-р техн. наук

О. В. П'ЯНКОВА¹, наук. співроб.

О. П. ФЕДОРОВ¹, дир., д-р фіз.-мат. наук, чл.-кор. НАН України

¹ Інститут космічних досліджень Національної академії наук України

та Державного космічного агентства України

Проспект Академіка Глушкова 40, Київ, Україна, 03187

² Львівський центр Інституту космічних досліджень Національної академії наук України

та Державного космічного агентства України

вул. Наукова 5а, Львів, Україна, 79060

КОСМІЧНИЙ ПРОЄКТ «ІОНОСАТ-МІКРО»: ГОТОВНІСТЬ ДО РЕАЛІЗАЦІЇ

«Іоносат-Мікро» — це фундаментальний науковий проєкт у сфері досліджень навколосемного космічного простору. Загальною метою проєкту є вивчення динамічних процесів в іоносфері для пошуку взаємозв'язку іоносферних збурень з процесами на Сонці, у магнітосфері, атмосфері та внутрішніх оболонках Землі. Проєкт задумано як відповідь на виклики, пов'язані з сучасним розвитком знань про космічну погоду та про вплив на іоносферу поверхневих джерел енерговиділення (погодних явищ, ліній електропередач, землетрусів та процесів їхньої підготовки, потужних техногенних катастроф тощо). Крім того, проєкт «Іоносат-Мікро» є логічним продовженням і розвитком попередніх іоносферних місій, таких як «Dynamics Explorer 2» (запущений у 1982 р.), «Freja» (1992 р.), «DEMETER» (2004 р.), «Swarm» (2013 р.) та CSES (2018 р.). Підготовка проєкту ведеться за підтримки і в рамках Загальнодержавної космічної програми України і Цільової програми НАН України з наукових космічних досліджень. В статті викладено наукові засади проєкту, описано параметри космічної системи, що створюється, склад і логіка роботи наукової апаратури. Для реалізації проєкту в ДП «КБ «Південне» створено спеціальну супутникову платформу «Мікросат-М», призначену для проведення наукових і технологічних експериментів. Планована орбіта — кругова сонячно-синхронна з нахилом 98° і висотою 600...700 км (параметри орбіти, спосіб і дата запуску підлягають уточненню). Корисне навантаження супутника включає набір наукових приладів для реєстрації динамічної структури і фізичних параметрів нейтральних і заряджених компонентів космічного середовища, тонкої просторової структури і фізичних параметрів космічних струмових систем і магнітного поля Землі, спектрів та хвильових форм електромагнітних збурень УНЧ-ННЧ-ДНЧ-діапазону. Для накопичення і цільового опрацювання даних вимірювань створено Центр збору, обробки і поширення даних проєкту, який надаватиме користувачам потужні засоби пошуку та отримання інформації.

Ключові слова: іоносфера, сонячно-земні зв'язки, космічна погода, комплекс наукової апаратури.

Цитування: Лізунов Г. В., Корепанов В. Є., Лукенюк А. А., П'янкova О. В., Федоров О. П. Космічний проєкт «Іоносат-Мікро»: готовність до реалізації. *Космічна наука і технологія*. 2022. **28**, № 6 (139). С. 3—11. <https://doi.org/10.15407/knit2022.06.003>

ВСТУП

Український супутниковий проєкт «Іоносат-Мікро» запропоновано з метою дослідження процесів у іоносфері, що виникають при дії потужних природних та антропогенних джерел енерговиділення. Формування наукових завдань проєкту відбувалося протягом тривалого часу, а концептуальні положення з'явилися ще в 1990-х роках, в ході підготовки космічної місії «Попередження», яка не була здійснена. Підготовка проєкту «Іоносат-Мікро» спершу велася в рамках і за підтримки Загальнодержавної космічної програми України, а у період 2018—2022 рр. — виключно Цільової програми НАН України з наукових космічних досліджень. В цей період спроектовано, виготовлено та випробувано бортовий комплекс наукової апаратури «Іоносат-Мікро» (далі — КНА «Іоносат-Мікро»), розгорнуто Центр збирання, опрацювання та розповсюдження даних, а в ДП «КБ «Південне» імені М. К. Янгеля» створено необхідну для реалізації проєкту супутникову платформу «Мікросат-М». Станом на сьогодні роботи над проєктом призупинені на стадії інтеграції та випробувань космічного апарата (КА) в цілому. В умовах мирного часу і при належному фінансуванні запуск КА «Мікросат-М» міг би відбутися вже в 2022 році.

Незважаючи на довгий строк підготування проєкту, його актуальність з часом тільки підвищилася. Це пов'язано із нещодавно виявленим відлунням в іоносфері процесів передавання електроенергії через високовольтні лінії електропередач [7]. Враховуючи, що об'єм вироблення електроенергії постійно збільшується, цей процес необхідно дослідити з метою запобігання появи ще одного джерела забруднення ближнього космосу.

НАУКОВІ ЦІЛІ ПРОЄКТУ

Навколоземний космічний простір є об'єктом широкого кола наукових досліджень — від робок прикладного характеру (у сфері навігації, телекомунікації, екологічного моніторингу, космічної погоди) до фундаментальних досліджень (космічна електродинаміка, колективні процеси у плазмі, прискорення елементарних

частинок, сонячно-земні зв'язки тощо). Особливу роль у структурі навколоземного космосу відіграє іоносфера — ущільнений шар плазми в діапазоні висот 50...1000 км. Як проміжна область між нейтральною атмосферою і високоіонізованою магнітосферою, іоносфера контролює взаємодію цих геосфер і сама бере в ній участь. Як наслідок, іоносфера демонструє потужний відгук на впливи як згори, так і знизу. В стані іоносфери відображаються фактори сонячної активності [12], а також потужні приземні явища, як природні — грози й тайфуни, виверження вулканів, землетруси і цунамі [4, 5, 9], так і антропогенні — запуски важких ракетноносіїв [3], робота навігаційних і ширококомовних радіостанцій тощо [6, 8, 11]. Спеціального дослідження вимагають дані про іоносферні провісники землетрусів [13]. Науковою спільнотою дискутується можливість використання іоносферних спостережень з метою діагностики значених джерел енерговиділення, і це закладає основи цілої нової методології моніторингу навколишнього середовища [10]. Слід підкреслити, що окреслена таким чином тематика відноситься до ключових компетенцій України в галузі космічних досліджень і у майбутньому може використовуватися як ефективний інструмент розвитку співробітництва з ЄКА.

Практична важливість іоносферних досліджень зумовлена ще й тією обставиною, що навколоземний космос став середовищем розміщення численних технічних систем, які забезпечують глобальну навігацію, телекомунікацію, спостереження Землі з космосу тощо, причому угруповання штучних супутників Землі з часом тільки розростається. Космічна інфраструктура зазнає безпосереднього впливу космічних факторів (так, варіації електронного вмісту іоносфери обмежують точність, а в ряді випадків й саму працездатність навігаційних супутникових систем, атмосферні збурення при впливі сонячних спалахів порушують траєкторії низькоорбітальних КА), що диктує необхідність контролю та своєчасного попередження операторів про зміни «космічної погоди» [12].

Призначення проєкту «Іоносат-Мікро» можна окреслити як наукова іоносферна місія. За-

гальною метою проєкту є вивчення динамічних процесів в іоносфері для пошуку взаємозв'язку іоносферних збурень з процесами на Сонці, у магнітосфері, атмосфері та внутрішніх оболонках Землі. Для досягнення зазначеної мети за допомогою узгоджених космічних та наземних вимірювань планується накопичити обширну статистику спостережних даних про стан іоносфери в областях космічного простору, через яку проходить траєкторія КА «Мікросат-М», що створюватиме основу для систематичного дослідження іоносферних відгуків на впливи згори і знизу — на фактори сонячної активності (сильні сонячні спалахи, корональні викиди мас, магнітні бурі), земні катаклізми (сильні та надсильні землетруси, виверження вулканів), техногенні джерела енерговиділення (робота енергомереж тощо).

Методологія реалізації проєкту «Іоносат-Мікро» ґрунтується на певних принципах, які вирізняють його на тлі попередників:

- комплексна діагностика газоплазмових та електродинамічних параметрів іоносфери на борту одного КА. З цією метою — проведення вимірювань відразу всім складом наукової апаратури або цілими групами приладів;

- пріоритетність моніторингових вимірювань з метою накопичення статистично значної вибірки даних про іоносферні параметри та їхню залежність від геліо- і геофізичних умов;

- проведення узгоджених космічних та дистанційних наземних спостережень;

- створення вебресурсу даних проєкту з метою залучення до обробки даних широкого кола фахівців.

Консорціум виконавців проєкту представлено в табл. 1.

КОСМІЧНИЙ АПАРАТ ТА ОРБИТА

Комплекс наукової апаратури «Іоносат-Мікро» встановлюється на платформу КА «Мікросат-М», створену в ДП КБ «Південне» для проведення наукових і технологічних експериментів [12]. Супутник планується запустити на кругову сонячно-синхронну орбіту, в діапазоні значень місцевого сонячного часу 10:00...11:00, з нахилом орбіти $I = 98^\circ$ і висотою 600...700 км. Така орбіта перетинатиме всі основні широтні утворення іоносфери: плазмосферу, авроральні овали, полярні вихори, середньоширотний провал, область каспа тощо. З точки зору фізики нейтральної атмосфери супутник запускатиметься

Таблиця 1. Організації-учасники проєкту «Іоносат-Мікро»

Організація-учасник	Роль
Інститут космічних досліджень НАН України та ДКА України (ІКД)	Координація виконання наукової програми. Центр управління ходом космічного експерименту. Центр обробки наукової інформації.
Львівський центр Інституту космічних досліджень НАН України та ДКА України (ЛЦ ІКД)	Координація робіт зі створення бортового комплексу наукової апаратури. Виготовлення магнітно-хвильового комплексу МВС, блоку електроніки для аналізатора щільності частинок АГЧ, системи збору наукової інформації СЗНІ. Проведення вимірювань, опрацювання даних.
Інститут технічної механіки НАН України та ДКА України (ІТМ)	Виготовлення аналізатора щільності частинок АГЧ в складі давачів DN, DE, проведення вимірювань, опрацювання даних
Державне підприємство «Конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля» (ДП «КБ «Південне»)	Створення КА «Мікросат-М», інтеграція корисного навантаження, планування роботи КА, формування супроводжувальної інформації про параметри КА
Національний центр управління та випробування космічних засобів ДКА України (НЦУВКЗ)	Керування польотом, прийом наукової та телеметричної інформації з борту КА
Центр космічних досліджень Польської академії наук (SRC PAS)	Виготовлення спектроаналізатора RFA, проведення вимірювань, опрацювання даних

Таблиця 2. Експлуатаційні характеристики КА «Мікросат-М»

ОРБИТА	
Кругова, експлуатаційний діапазон висот	620...710 км
Нахил	97.9...98.2°
Сонячно-синхронна, місцевий час в низхідному вузлі	10...14 год
ОРІЄНТАЦІЯ	
Тип	активна тривісна
Точність орієнтації в орбітальній системі координат	5° (3σ)
Кутові швидкості стабілізації КА	<0.01 °/с (3σ)
ПЕРЕДАЧА ДАНИХ НА ЗЕМЛЮ	
Радіолінія Х-діапазону	30.72 Мбіт/с
Службова радіолінія S-діапазону	32 кбіт/с
МАСА КА	
Загальна	до 200 кг
Зокрема корисного навантаження	до 75 кг
ГАРАНТІЙНИЙ ТЕРМІН ФУНКЦІОНУВАННЯ КА	не менше трьох років
ПОХИБКИ КООРДИНАТНО-ЧАСОВОЇ ПРИВ'ЯЗКИ ВИМІРЮВАНЬ	
Похибка позиціонування КА	≤1 км
Похибка визначення орієнтації КА (осей датчиків)	≤1°
Похибка шкали бортового часу	≤1 мс

в екзосферу. Експлуатаційні характеристики КА «Мікросат-М» вказано в табл. 2.

НАУКОВА АПАРАТУРА

Комплекс наукової апаратури «Іоносат-Мікро» призначений для досягнення мети проекту шляхом реєстрації:

- динамічної структури і фізичних параметрів нейтральних і заряджених компонентів космічного середовища,
- тонкої просторової структури і фізичних параметрів космічних струмових систем і магнітного поля Землі,
- електромагнітних хвиль УНЧ — ННЧ — ДНЧ-діапазону.

Загальну характеристику КНА наведено в табл. 3. Розміщення давачів на платформі КА показано на рис. 1.

З метою реєстрації повного спектру плазмових хвиль, наявних в іоносфері, до складу корисного навантаження введено відразу два прилади для електромагнітних вимірювань: магнітно-хвильовий комплекс MWC для вимірювання низькочастотних хвиль і спектроаналізатор RFA для вимірювань в області високих частот.

Магнітно-хвильовий комплекс MWC складається з ферозондового магнітометра FGM для реєстрації вектора постійного магнітного поля Землі та його варіацій, трьох хвильових зондів

Таблиця 3. Комплекс наукової апаратури «Іоносат-Мікро»

Прилади	Вимірювані параметри/інше	Керівник
Магнітно-хвильовий комплекс MWC у складі ферозондового магнітометра FGM, трихвильових зондів WP та електричного зонда EP	Три компоненти магнітного поля (0...18500 Гц), три компоненти електричного поля (1...18500 Гц), три компоненти густини електричного струму (1...18500 Гц)	С. М. Беляєв, ЛЦ ІКД, Україна
Спектроаналізатор RFA	Спектри трьох компонентів електричного поля (20 кГц ... 15 МГц)	Н. Rothkaehl, SRC-PAS, Польща
Аналізатор щільності частинок АГЧ у складі блоку давачів нейтрального газу DN і теплових електронів DE	Концентрація і температура нейтрального газу (10 ⁵ ...10 ¹¹ см ⁻³ , 600...2000 К), концентрація і температура теплових електронів (10 ³ ...10 ⁸ см ⁻³ , 0.1...1 eВ)	В. А. Шувалов, ІТМ, Україна
Система збору наукової інформації (СЗНІ)	Вхідний інформаційний потік (до 100 Мбіт/с). Вихідний потік (до 64 Мбіт/с). Обсяг накопичувача (512 ГБ).	А. А. Лукенюк, ЛЦ ІКД, Україна

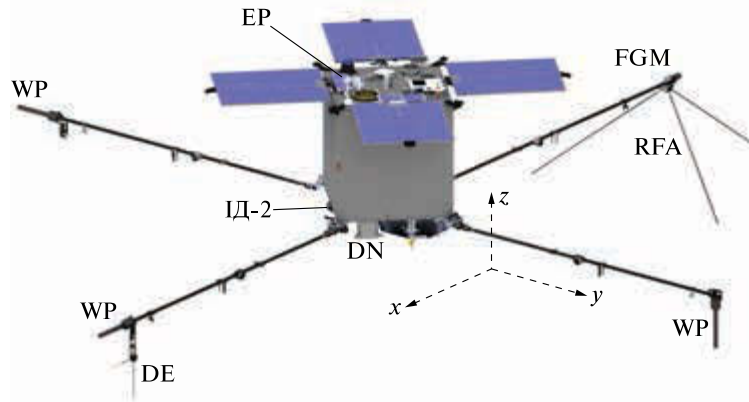


Рис. 1. Загальний вигляд КА «Мікросат-М» із зазначенням розташування давачів КНА «Іоносат-Мікро». Розміри апарату $0.7 \times 0.7 \times 0.75$ м, довжина штанг в розгорнутому стані 2 м. В штатній конфігурації вісь Z орієнтована вертикально, супутник рухається в напрямку осі X

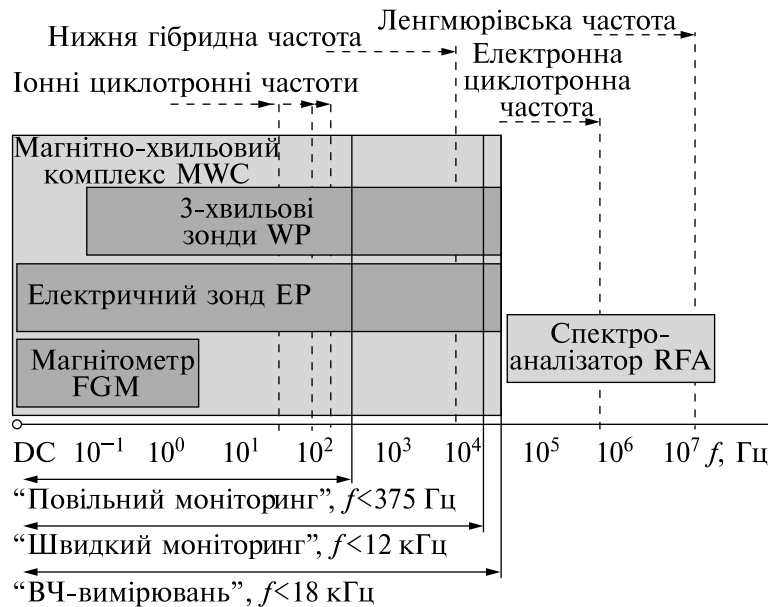


Рис. 2. Покриття частот вимірювань приладами MWC і RFA

WP для реєстрації змінного магнітного поля, електричного струму та електричного потенціалу плазми, і електричного зонда EP. При цьому частотні діапазони ферозондового магнітометра FGM (0...10 Гц) й індукційних магнітометрів у складі хвильових зондів WP (1...18500 Гц) перекриваються між собою, що забезпечує вимірювання трьох компонентів магнітного поля у загальній смузі частот 0...18500 Гц.

До складу кожного з хвильових зондів WP входить щілинний зонд Ленгмюра для вимірювання однієї складової електричного струму (1...18500 Гц) і потенціалу плазми (1...18500 Гц). Три щілинні зонди Ленгмюра в складі MWC забезпечують реєстрацію трьох складових змінного електричного струму і двох складових електричного поля. Для вимірювання третьої складової електричного поля служить електричний зонд

ЕР, встановлений на корпусі КА поза площиною розташування WP. Таким чином, у смузі частот 1...18500 Гц досягається реєстрація всіх трьох складових електричного поля і трьох складових електричного струму.

Реєстрація хвильових форм приладом MWC доповнюється вимірюваннями спектрів трьох складових електричного поля спектроаналізатором RFA в діапазоні частот 20 кГц ... 15 МГц. Робочі діапазони частот приладів MWC і RFA показано на рис. 2.

Для діагностики газодинамічних параметрів космічного середовища служить аналізатор щільності частинок АГЧ, який включає блок з двох інверсійно-магнетронних перетворювачів DN для вимірювання концентрації і температури нейтрального газу і два зонди Ленгмюра DE для вимірювання концентрації і температури теплових електронів. Частота знімання даних АГЧ становить 1...10 Гц, що забезпечує реєстрацію просторових неоднорідностей космічного середовища з роздільністю 1.5...15 км. Давачі цього приладу розміщуються в зонах, не збурених рухом КА: блок DN — безпосередньо на корпусі КА в носовій частині, блок DE винесено вперед по ходу руху на штанзі.

Детальне обґрунтування та опис приладів КНА «Іоносат-Мікро» представлено в роботі [1].

ПРОГРАМА ВИМІРЮВАНЬ

Досягнення наукових цілей проекту «Іоносат-Мікро» вимагає, з одного боку, довгострокових і безперервних спостережень, які забезпечать глобальне покриття іоносфери або її значних районів, а з іншого боку — якомога детальніших вимірювань при спільній роботі з наземними або іншими космічними засобами. Конкретні циклограми вимірювань укладатимуться як компроміс цих вимог, з урахуванням необхідності дотримання інформаційного балансу — кількість інформації, що реєструється на борту КА, та кількість інформації, що передається на Землю, повинні бути в середньому рівні, а також дотримання енергетичного балансу КА.

Інформаційний баланс. До складу КНА входить високоінформативний магнітно-хвильовий комплекс MWC з частотою дискретизації даних

до 50 кГц і відносно низькоінформативні прилади: спектроаналізатор RFA (з частотою зйому даних 1 Гц) та аналізатор щільності частинок АГЧ (1...10 Гц). Інформаційна продуктивність зазначених приладів становить:

- магнітно-хвильової MWC — до 1 Мбайт/с,
- спектроаналізатор RFA — порядку 4 кбайт/с,
- аналізатор густини частинок АГЧ — порядку 10 кбайт/с.

Дані наукових приладів передаються на Землю по радіолінії X-діапазону в обсязі до 5 Гбайт за добу. В таких умовах режими проведення вимірювань поділено на три основні групи.

1. «Повільний моніторинг» — режим неперервної реєстрації параметрів іоносфери впродовж декількох діб і більше з частотою дискретизації даних MWC 780 Гц, частотою зрізу фільтра нижніх частот в складі MWC 375 Гц, частотою знімання даних інших приладів — відповідно до швидкості їхнього спрацювання. Сумарна інформативність режиму 20...30 кбайт/с. Внаслідок обмеженого енергоресурсу КА (див. далі) режим повільного моніторингу вимушено розділяється на підрежими, що відрізняються комбінаціями одночасно працюючих приладів.

2. «Швидкий моніторинг» — режим вимірювань всім складом КНА протягом двох-трьох витків на добу. При цьому частота опитування MWC становить 25 кГц, частота зрізу фільтра нижніх частот MWC — 11.9 кГц, інформативність режиму — порядку 0.5 Мбайт/с або 2.5 Гбайт/виток. Цей режим реалізує реєстрацію хвильових форм електромагнітних збурень аж до ДНЧ-діапазону.

3. «ВЧ-вимірювання» — режим максимально детальних вимірювань всім складом КНА з тривалістю менше 1 витка. Частота опитування MWC в цьому режимі становить 50 кГц, частота зрізу фільтра нижніх частот MWC — 18.5 кГц, інформативність режиму — порядку 1 Мбайт/с, або 5 Гбайт/виток. Режим «ВЧ-вимірювань» забезпечує реєстрацію спектру іоносферних плазмових хвиль практично без проміжку між частотами зрізу магнітно-хвильового комплексу MWC і спектроаналізатора RFA (рис. 2).

Описані режими вимірювань є орієнтовними. Оскільки технологія управління КНА забезпе-

чує можливість вмикання довільних комбінацій і циклограм роботи приладів, в ході експерименту він може бути змінений.

Енергетичний баланс. Система енергозабезпечення КА виділяє на корисне навантаження до 200 Вт пікової потужності і до 28 Вт середньодобової потужності, при чому по мірі деградації сонячних батарей остання величина буде з часом зменшуватися.

Водночас енергоспоживання приладів становить:

- магнітно-хвильового комплексу MWC — до 12.5 Вт,
- спектроаналізатора RFA — від 7 до 12 Вт,
- аналізатора густини частинок АГЧ — до 6 Вт,
- системи збору наукової інформації СЗНІ — 7 Вт пікове та 5...6 Вт середнє значення.

В таких умовах реалізація режиму «повільного моніторингу» можлива тільки при умові вмикання частини приладів корисного навантаження. Конкретну циклограму роботи буде розроблено при проведенні передполітних випробувань. Режими «швидкого моніторингу» і «ВЧ-вимірювань» передбачають вмикання КНА цілком.

ЦЕНТР ОБРОБКИ НАУКОВОЇ ІНФОРМАЦІЇ

Для накопичення і цільового опрацювання отриманих даних в Інституті космічних досліджень утворено Центр збору, обробки і поширення супутникових даних, програмно-апаратний компонент якого отримав найменування PROMIS (від PROCessed Measurements of Ionospheric Satellites). Створене програмне забезпечення системи PROMIS забезпечує багаторівневу обробку інформації — від завантаження вхідних даних із серверів приймальних радіостанцій у вигляді, в якому ці дані були отримані від супутника, до створення бази даних, прив'язаних до місця та часу і перетворених у загальноприйняті у фізиці іоносфери одиниці вимірювань. Для системи PROMIS розроблено перспективний вебінтерфейс, який надає користувачам потужні засо-

би пошуку та отримання інформації. Детальний опис системи PROMIS представлено у роботі [2].

ВИСНОВКИ

1. Протягом підготовки проєкту «Іоносат-Мікро» вперше в Україні здійснено повноцінну підготовку та реалізацію повного циклу наукового космічного проєкту від розроблення наукової програми та інструментарію до інтеграції з космічною платформою та створення центру оброблення наукової інформації. Запуск космічного апарата з науковим інструментарієм «Іоносат-Мікро» забезпечить не тільки виконання запланованих експериментів, а й слугуватиме тестом на спроможність України реалізувати власний науковий космічний проєкт.

2. Аналіз результатів підготовки проєкту «Іоносат-Мікро» та стану сучасних досліджень в галузі моніторингу іоносфери та космічної погоди свідчить про актуальність завдань, поставлених при ініціюванні проєкту та про зацікавленість міжнародної наукової спільноти (зокрема фахівців ЄКА) в одержанні результатів проєкту «Іоносат-Мікро».

3. Проведені дослідження в галузі динамічних процесів у навколоземній плазмі, а також створення кооперації, яка забезпечує орбітальні та наземні спостереження, відкривають можливість подальшого розвитку одного з найперспективніших напрямів досліджень в Україні — вивчення геокосмосу.

4. Перспективи використання результатів проєкту «Іоносат-Мікро» суттєвим чином пов'язані із перспективним для України масштабним завданням організації системного супутникового моніторингу загрозливих та катастрофічних явищ. Забезпечення завдань у сфері енергетичної безпеки мають високі шанси на ефективне вирішення при умові залучення даних іоносферного моніторингу.

Роботу виконано в рамках і за фінансової підтримки договорів Цільової програми НАН України з наукових космічних досліджень на 2018—2022 рр.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Космический проект «Ионосат-Микро»*: монография. Под общ. ред. С. А. Засухи, О. П. Фёдорова. Киев: Академ-периодика, 2013. 218 с.
2. П'янкova Е. В., Лизунов Г. В., Меланченко А. Г., Протас А. Н. Информационная система сбора, обработки и распространения данных для геокосмических спутниковых проектов. *Космічна наука і технологія*. 2020. **26**, № 1 (122). С. 37—47. <https://doi.org/10.15407/knit2020.01.037>
3. Черногор Л. Ф. *Радиофизические и геомагнитные эффекты стартов ракет*. Монография. Харьков: ХНУ имени В. Н. Каразина, 2009. 386 с.
4. Черногор Л. Ф. *Физика и экология катастроф*. Монография. Харьков: ХНУ имени В. Н. Каразина, 2012. 555 с.
5. Ямпольский Ю. М., Зализовский А. В., Литвиненко Л. Н., Лизунов Г. В., Грос К., Мордвин М. Вариации магнитного поля в Антарктике и сопряженном регионе (Новая Англия), стимулированные циклонической активностью. *Радиофизика и радиоастрономия*. 2004. **9**, № 2. С. 130—151
6. Bullough K., Kaiser R. Strangeways H. J. Unintentional man-made modification effects in the magnetosphere. *J. Atmospheric and Terrestrial Phys.* 1985. **47**. P. 1211—1223.
7. Dudkin F., Korepanov V., Dudkin D., Pilipenko V., Pronenko V., Klimov S. Electric field of the power terrestrial sources observed by microsatellite Chibis-M in the Earth's ionosphere in frequency range 1—60 Hz. *Geophys. Res. Lett.* 2015. **42**. P. 5686—5693. <https://doi.org/10.1002/2015gl064595>
8. Parrot M. World map of ELF/VLF emissions as observed by low-orbiting satellite. *Ann. Geophys.* 1990. **8**. P. 135—145.
9. Rolland L. M., Lognonné P., Astafyeva E., Kherani E. A., Kobayashi N., Mann M., Munekane H. The resonant response of the ionosphere imaged after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake. *Earth Planets Space*. 2011. **63**, № 7. P. 853—857.
10. Rothkaehl H., Izhovkina N., Prutensky I., Pulinets S., Parrot M., Lizunov G., Blecki J., Stanislawski I. Ionospheric disturbances generated by different natural processes and by human activity in Earth plasma environment. *Ann. Geophys.* 2004. **47**, № 2/3. P. 1215—1226.
11. Rothkaehl H., Parrot M. Electromagnetic emissions detected in the topside ionosphere related to the human activity. *J. Atmospheric and Terrestrial Phys.* 2005. **67**, № 8-9. P. 821—828
12. Schrijver C. J., Kauristie K., Aylward A. D., Denardini C. M., Gibson S. E., Glover A., Gopalswamy N., Grande M., Hapgood M., Heynderickx D., Jakowski N., Kalegav V. V. Understanding space weather to shield society: A global road map for 2015—2025 commissioned by COSPAR and ILSW. *Adv. Space Res.* 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.asr.2015.03.023>
13. *The Frontier of Earthquake Prediction Studies*. Ed. M. Hayakawa. Tokyo, Nihon-senmontosho-Shuppan, 2012. 794 p.

REFERENCES

1. Space Project “Ionosat-Micro”: monograph (2013). Eds S. A. Zasukha, O. P. Fedorov. K.: Academperiodic, 218 p. [in Russian].
2. Piankova O., Lizunov G., Melanchenko A., Protas O. (2020). Information system for collection, processing and distribution data of Geospace projects. *Space Science and Technology*, **26**, № 1 (122), 37—47. <https://doi.org/10.15407/knit2020.01.037>
3. Chernogor L. F. (2009). *Radiophysics and geomagnetic effects of rocket launches*. Monograph. Kharkov: KhNU named after V. N. Karazin [In Russian].
4. Chernogor L. F. (2012). *Physics and ecology of catastrophes*. Monograph. Kharkov: KhNU named after V. N. Karazin [In Russian].
5. Yampolski Yu. M., Zalizovski A. V., Litvinenko L. N., Lizunov G. V., Groves K., Moldwin M. (2004). Magnetic field variations in Antarctica and the conjugate region (New England) stimulated by cyclone activity. *Radiophysics and Radioastronomy*, **9**, № 2, 130—151 [In Russian].
6. Bullough K., Kaiser R. Strangeways H. J. (1985). Unintentional man-made modification effects in the magnetosphere. *J. Atmospheric and Terrestrial Phys.*, **47**, 1211—1223.
7. Dudkin F., Korepanov V., Dudkin D., Pilipenko V., Pronenko V., Klimov S. (2015). Electric field of the power terrestrial sources observed by microsatellite Chibis-M in the Earth's ionosphere in frequency range 1—60 Hz. *Geophys. Res. Lett.*, **42**, 5686—5693. <https://doi.org/10.1002/2015gl064595>
8. Parrot M. (1990). World map of ELF/VLF emissions as observed by low-orbiting satellite. *Annales Geophysicae*, **8**, 135—145.
9. Rolland L. M., Lognonné P., Astafyeva E., Kherani E. A., Kobayashi N., Mann M., Munekane H. (2011). The resonant response of the ionosphere imaged after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake. *Earth Planets Space*, **63**, № 7, 853—857.
10. Rothkaehl H., Izhovkina N., Prutensky I., Pulinets S., Parrot M., Lizunov G., Blecki J., Stanislawski I. (2004). Ionospheric disturbances generated by different natural processes and by human activity in Earth plasma environment. *Ann. Geophys.*, **47**, № 2/3. P. 1215—1226.

11. Rothkaehl H., Parrot M. (2005). Electromagnetic emissions detected in the topside ionosphere related to the human activity. *J. Atmospheric and Terrestrial Phys.*, **67**, 8-9, 821–828.
12. Schrijver C. J., Kauristie K., Aylward A. D., Denardini C. M., Gibson S. E., Glover A., Gopalswamy N., Grande M., Naggood M., Heynderickx D., Jakowski N., Kalegaev V. V. (2015). Understanding space weather to shield society: A global road map for 2015–2025 commissioned by COSPAR and ILSW. *Adv. Space Res.* <http://dx.doi.org/10.1016/j.asr.2015.03.023>
13. *The Frontier of Earthquake Prediction Studies*. Hayakawa M. (Ed.) (2012). Tokyo, Nihon-senmontosho-Shuppan.

Стаття надійшла до редакції 07.09.2022

Після доопрацювання 08.09.2022

Прийнято до друку 17.11.2022

Received 07.09.2022

Revised 08.09.2022

Accepted 17.11.2022

G. V. Lizunov, Head of Laboratory, Ph. D. in Phys & Math.

E-mail: georgii.lizunov@gmail.com

V. Korepanov, Deputy Director, Dr. Sci. in Tech

A. A. Lukenyuk, Director, Dr. Sci. in Tech

O. V. Piankova, Researcher

O. P. Fedorov, Director, Dr. Sci. in Phys & Math, Correspondent Member of NAS of Ukraine

¹ Space Research Institute of National Academy of Sciences of Ukraine and State Space Agency of Ukraine

40 Glushkova Ave., build. 4/1, Kyiv, 03187 Ukraine

² Lviv Centre of Space Research Institute of National Academy of Sciences of Ukraine

and State Space Agency of Ukraine,

5a Naukova Str., Lviv, 79060 Ukraine

SPACE PROJECT “IONOSAT – MICRO”: READINESS FOR IMPLEMENTATION

Ionosat-Micro is a fundamental scientific project devoted to the study of near-Earth space. The project is conceived as an answer to the challenges posed by the modern development of knowledge about Space Weather and the ionospheric responses to surface energy sources (such as weather phenomena, power lines operation, earthquakes and processes of their preparation, powerful technogenic hazards, etc.). Furthermore, the project Ionosat-Micro is a logical continuation and addition to previous ionospheric missions, such as Dynamics Explorer 2 (launched in 1982), Freja (1992), DEMETER (2004), Swarm (2013), and CSES (2018). The project is being prepared with the support and within the framework of The National Space Program of Ukraine and The Program of the National Academy of Sciences of Ukraine for Scientific Space Research. The article outlines the scientific principles of the project, describes the parameters of the space system being created, and the composition and operation logic of the scientific equipment. The project is to be implemented on board the satellite platform Microsat-M, which has been designed by Yuzhnoye State Design Office to conduct scientific and technological experiments. The planned satellite orbit is circular sun-synchronous with an inclination of 98 degrees and altitude of 600–700 km (orbital parameters, method and date of the launch are being clarified). Ionosat-Micro payload includes a set of scientific instruments designed to register the global structure and physical parameters of the neutral atmosphere and plasma, the structure and parameters of the space current systems and geomagnetic field, as well as the spectra and wave-forms of ULF-ELF-VLF electromagnetic perturbations. The Center for Collection, Processing, and Distribution of Measurement Data was created for the purpose of accumulating and targeted data processing.

Keywords: ionosphere, solar-terrestrial links, space weather, scientific instrumentation

<https://doi.org/10.15407/knit2022.06.012>
УДК 550.34:550.510.533

І. Г. ЗАХАРОВ, старш. наук. співроб., канд. фіз.-мат. наук. Лауреат Премії Ради Міністрів СРСР
E-mail: giz-zig@ukr.net

Л. Ф. ЧОРНОГОР, Заслужений професор, Заслужений діяч науки і техніки України, лауреат Державної премії УРСР в галузі науки і техніки (1989 р.), двічі лауреат Премії Ради Міністрів СРСР, д-р фіз.-мат. наук, проф.
ORCID ID: 0000-0001-5777-2392
E-mail: Leonid.F.Chernogor@gmail.com

Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна
пл. Свободи 4, Харків, Україна, 61022

ГЛОБАЛЬНІ ТА ЛОКАЛЬНІ ЕФЕКТИ СЕЙСМІЧНОЇ АКТИВНОСТІ В ІОНОСФЕРІ

З використанням карт повного електронного вмісту (ПЕВ) іоносфери (<http://www.aiub.unibe.ch/download/CODE/>) для північної півкулі, окрім полярної області, за зимові сезони 2012—2018 років розглянуто іоносферні ефекти потужних сейсмічних подій. Показано, що сейсмо-іоносферний ефект є загальнопланетарним, на який накладаються локальні ефекти над осередками окремих землетрусів (ЗТ). Часові варіації ПЕВ поблизу моментів сильних ЗТ на далекій відстані від їхніх осередків (глобальний ефект) складаються з двох максимумів: передвісника та «афтершокового» максимуму. У варіаціях ПЕВ над осередком ЗТ (локальний ефект) зазвичай реєструється лише передвісник, амплітуда якого у нічні години приблизно удвічі більша (у середньому біля 8 %), ніж удень. Завжди (локально та глобально) за позитивним сплеском ПЕВ спостерігаються його зменшені значення протягом кількох діб. Зона максимальної амплітуди сейсмо-іоносферного ефекту припадає на середні широти, особливо 35...40° пн. ш., а в межах цієї зони — на довготи поблизу 30° зх. д. (Серединно-Атлантичний хребет) та 140...150° сх. д. (Японські острови та прилегла акваторія Тихого океану). Широтні амплітудні максимуми сейсмо-іоносферного ефекту добре збігаються з широтними максимумами кількості ЗТ як у географічній, так і геомагнітній системах координат. Зміни кількості ЗТ та, відповідно, ефекту в іоносфері за геомагнітними координатами більш впорядковані. Це свідчить про значний вплив на сейсмічність тих самих процесів на межі рідкого ядра та нижньої магнії, що зумовлюють формування магнітного поля Землі. Крім сейсмічних поясів та зон серединно-океанічних хребтів, збільшення ПЕВ зафіксовано уздовж так званих лінеаментів, що маркують ослаблені зони земної кори з підвищеними потоками глибинних газів. Відповідність просторових особливостей сейсмічності та сейсмо-іоносферного ефекту свідчать на користь «радонового» механізму літосферно-іоносферного зв'язку та опосередковано підтверджують роль глибинних газів у формуванні загальнопланетарних особливостей сейсмічності.

Ключові слова: іоносфера, сейсмічність, повний електронний вміст, літосферно-іоносферна взаємодія, локальні збурення, загальнопланетарні збурення.

ВСТУП

Іоносферні ефекти землетрусів (ЗТ) займають важливе місце у сучасних дослідженнях. Виходячи з практичної задачі пошуку передвісників ЗТ, необхідних для прогнозування цього небезпечного явища, основну увагу приділяють ефек-

там напередодні окремих потужних ЗТ (див., наприклад, [13, 24, 25, 29, 31, 34]). Зазвичай дослідження проводять у межах так званої зони прояву передвісників, радіус R якої визначається магнітудою землетрусу M [5]:

$$R_d = e^M \text{ (км)}. \quad (1)$$

Цитування: Захаров І. Г., Черногор Л. Ф. Глобальні та локальні ефекти сейсмічної активності в іоносфері. *Космічна наука і технологія*. 2022. 28, № 6 (139). С. 12—24. <https://doi.org/10.15407/knit2022.06.012>

З наведених та інших досліджень випливає загальна закономірність: іоносферні передвісники в осередках майбутніх ЗТ з'являються за 1...5 діб до головного поштовху. Іоносферні аномалії (зазвичай варіації повного електронного вмісту (ПЕВ) іоносфери, рідше — критичної частоти області F2) амплітудою від кількох відсотків до (рідко) кількох десятків відсотків напередодні ЗТ можуть бути як позитивними, так і негативними; деякі дослідники наголошують, що передвісник з'являється лише у нічній іоносфері [34].

В окремих дослідженнях допускається наявність сейсмічних ефектів в іоносфері на довільній відстані від осередків потужних ЗТ [6, 36]. Крім того, у роботі [33] показано, що сейсмічність є важливим чинником змін глобального електричного кола, що також може вплинути на процеси літосферно-іоносферної взаємодії у планетарному масштабі. Роботи [6, 33, 36] об'єднує також підхід до сейсмічності як глобального безперервного тектонічного процесу, що є характерним у цілому для сучасних досліджень (див., наприклад, [4, 14]).

В останні роки все частіше як основний механізм впливу літосфери на атмосферу та іоносферу називають вихід на земну поверхню радіоактивного радону як складової потоку глибинних газів. Найчастіше радоновий механізм згадують для пояснення локальних ефектів поблизу гіпоцентрів сильних ЗТ [13, 15, 28, 31]. Водночас добре відомо, що вихід на поверхню глибинних газів — загальнопланетарний процес, найбільш активний у зонах серединно-океанічних хребтів і сейсмоактивних поясах Землі [3, 10, 15, 16].

Вихід радону та інших глибинних газів на поверхню пов'язують також із так званими лінеаментами (в останні роки їх активно картують за космічними знімками) — протяжними зонами різного масштабу та напрямків на земній поверхні, яким у земній корі відповідають насамперед розломи та зони тріщинуватості [2, 7]. В останні роки лінеаменти почали розглядати як зони (канали) підвищеної проникності земної кори, що служать провідними шляхами для розчинів і газів [2]. Цей процес нерідко призводить до змін характеристик приземної атмосфери та появи унікальних явищ: протанення снігу у ви-

гляді протяжних вузьких зон, лінійності хмарного покриву тощо. На загальнопланетарному рівні зазвичай виділяють широтні лінеаменти стискання, довготні — розтягнення та діагональні — сколювання [2].

Раніше [6, 36] наявність сейсмічних ефектів на довільній відстані від осередків потужних ЗТ було показано з використанням даних окремих континентальних метеорологічних та іоносферних пунктів спостережень, що не дало змоги встановити просторові особливості цих ефектів і дослідити фізичні процеси їхньої генерації. У цій роботі для подолання вказаних обмежень використано щоденні карти повного електронного вмісту, а також для порівняння розглянуто локальні іоносферні ефекти над осередками ЗТ.

БАЗА ДАНИХ І МЕТОДИ АНАЛІЗУ

Аналіз проведено для зимових (грудень — січень) сезонів 2012—2018 років. За ці інтервали часу за даними сайту <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search> обрано 22 ЗТ з магнітудою M від 6.3 до 7.9 незалежно від їхніх координат та обов'язково після періоду відносного сейсмічного затишшя для попередження накладання ефектів близьких у часі ЗТ. Зона прояву передвісників R_d для цих ЗТ, згідно з виразом (1), становить від 545 до 2697 км. Основна частина сильних ЗТ відбулась у екваторіальній зоні північної та південної півкулі.

Для дослідження іоносферних ефектів використано карти ПЕВ іоносфери за результатами обробки сигналів навігаційних супутників GPS (<http://www.aiub.unibe.ch/download/CODE/>) в інтервалі широт $0..60^\circ$ пн. ш. (вся північна півкуля, окрім полярної зони) з кроком 2.5° по широті та 5° по довготі, а також дані поблизу осередків потужних ЗТ за цей час. Через дискретний характер іоносферних даних як локальна характеристика обиралося значення ПЕВ у вузлі сітки, найближчому до координат ЗТ. При цьому відстань від гіпоцентра ЗТ становила у більшості випадків 100...150 км, що у разі менше від зони прояву передвісників (1) для розглянутих магнітуд ЗТ. Для виключення добових іоносферних варіацій використано усереднені значення ПЕВ за добу (при дослідженні глобального ефекту: ну-

львий день — день ЗТ) та значення ПЕВ для одного й того ж місцевого часу, що збігається з часом головного поштовху ЗТ (при дослідженні локального ефекту). Нижче значення ПЕВ наведені в одиницях $\text{TECU} = 10^{16} \text{ м}^{-2}$.

Розрахунки проведено методом накладених епох з оцінкою достовірності результатів за критерієм Фрідмана (доцільність використання цього критерію показано в роботі [6]). Використано також кореляційний аналіз.

РЕЗУЛЬТАТИ

Глобальні ефекти. На рис. 1 наведено зміни ПЕВ, усереднені для всіх розглянутих ЗТ і для всієї північної півкулі, крім полярної області. Для порівняння на рисунку наведено також середні зміни сонячної (СА) та геомагнітної (ГМА) активності для тих самих умов. Зміни СА незначні (не більше 3 %) та випадкові по відношенню до нульового дня. Рівень ГМА залишався низьким навіть під час невеликого зростання поблизу нульового дня. Відзначимо, що таке збільшення ГМА є досить типовим [6, 17, 19, 36]. Видно, що зміни ПЕВ не збігаються зі змінами космічних факторів, тобто з високою імовірністю зумовлені саме впливом «знизу» (літосфера, тропосфера). Сейсмо-іоносферний ефект проявився у вигляді подвійного максимуму, перший (передвісник) — дещо більший, ніж другий, вже після ЗТ («афтершоковий» максимум). Завдяки значному усередненню при використанні карт (1368 середньодобових значень) результат має високу статистичну достовірність (рівень значущості за критерієм Фрідмана): $p < 0.05$. Перед сплеском ПЕВ спостерігається короткочасне зменшення, після нього — досить тривале невелике зменшення значень ПЕВ. Наявність тренду може бути зумовлене неповною компенсацією сезонних змін ПЕВ.

У межах всієї північної півкулі сейсмо-іоносферний ефект достатньо однотипний. Особливості полягають у тому, що на окремих широтах і довготах, крім основного, з'являються більш ранні сплески ПЕВ (в основному на широтах 55° і вище), але не раніше, ніж за 6 діб до ЗТ (див. рис. 2). Наявність таких сплесків ПЕВ дозволяє припустити, що передвісник для довільних ЗТ можливий за 1...6 діб до ЗТ, хоча для обраних

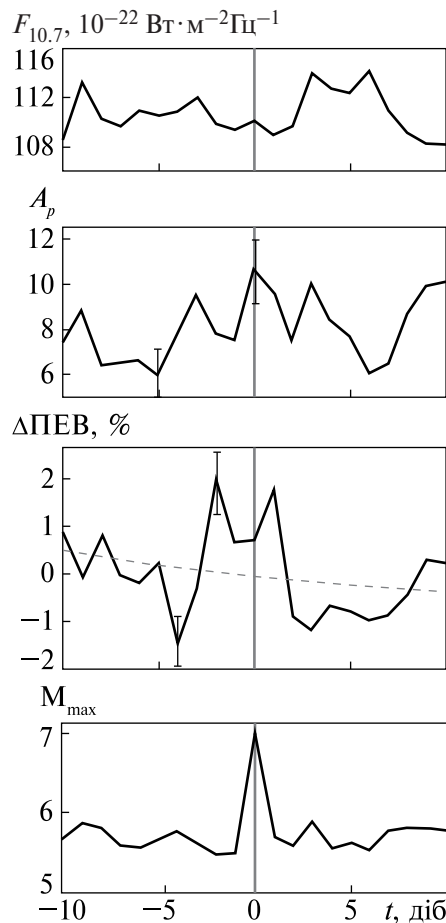


Рис. 1. Середні зміни ПЕВ іоносфери у північній півкулі під час сильних землетрусів. Вертикальною лінією тут і надалі показано момент ЗТ. Штриховою лінією показано тренд

ЗТ основний ефект проявився за дві доби до ЗТ. Лише на окремих довготах азійського сектору обидва максимуми ПЕВ зливаються в один за добу до ЗТ. Майже завжди амплітуда першого максимуму (сплеск ПЕВ до початку ЗТ) дещо більша, ніж у другого, і лише іноді — навпаки. Такий ефект має складний широтно-довготний характер: другий максимум в основному більший там, де амплітуда ефекту більша (рис. 3).

Розглянемо більш детально амплітуду $\Delta\text{ПЕВ}_{eq}$ сейсмо-іоносферного ефекту (рис. 3). Зона, де амплітуда сплеску ПЕВ вища за середній рівень (на рисунку виділено сірим кольором), має форму неправильного овалу, вісь симетрії якого майже збігається з положенням геомагнітного полюса

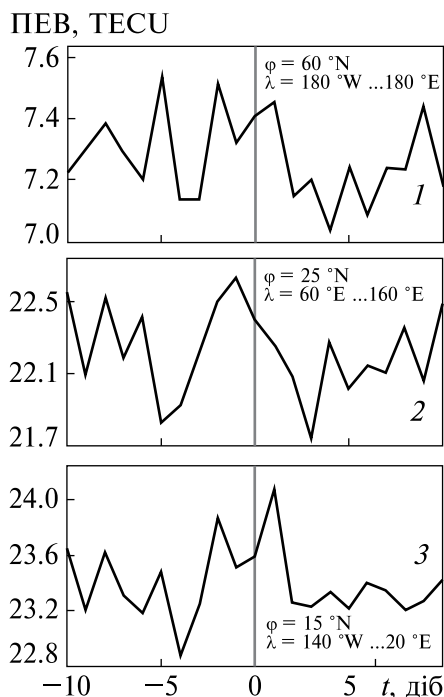


Рис. 2. Регіональні особливості сейсмо-іоносферного ефекту: 1 — додаткові сплески ПЕВ за 3...6 діб до ЗТ, 2 — єдиний максимум ПЕВ, 3 — другий максимум ПЕВ, вищий від першого. Цифрами вказано координати, для яких розраховано зміни ПЕВ

за період, що розглядається (використано дані на середину досліджуваного інтервалу часу, а саме за 2015 рік; URL: <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/poles/polesexp.html>). Для південного краю овалу добре помітні чотири зони, по дві навпроти одна одної, де овал має виступи на південь. Можливо, це є результатом впливу стаціонарних планетарних хвиль на процес формування сейсмо-іоносферного ефекту. Північний край овалу менш чіткий. Це можна пов'язати з тим, що північна границя овалу проходить поблизу краю досліджуваної широтної зони (до 60° пн. ш.), а також з тим, що на широтах порядку 55° та вище фонові значення ПЕВ дуже малі, часто менші від 1 TECU, через що навіть окремі невеликі сплески ПЕВ можуть значно вплинути на результат (у відсотках).

Локальні ефекти. Зміни ПЕВ над осередками ЗТ наведено на рис. 4, а. Основним сейсмічним ефектом у ПЕВ іоносфери є передвісник з амплітудою близько 6 %, що з'явився за два дні до ЗТ.

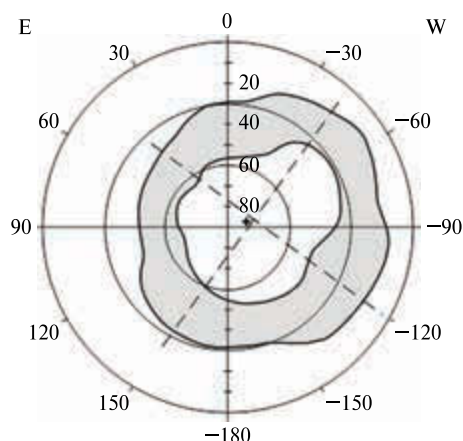


Рис. 3. Овал максимальних значень сейсмо-іоносферного ефекту (значення $\Delta\text{ПЕВ}_{eq}$ більші від середнього, виділено сірим кольором). Штрихові лінії — осі овалу, хрестик — положення геомагнітного полюса (2015 рік)

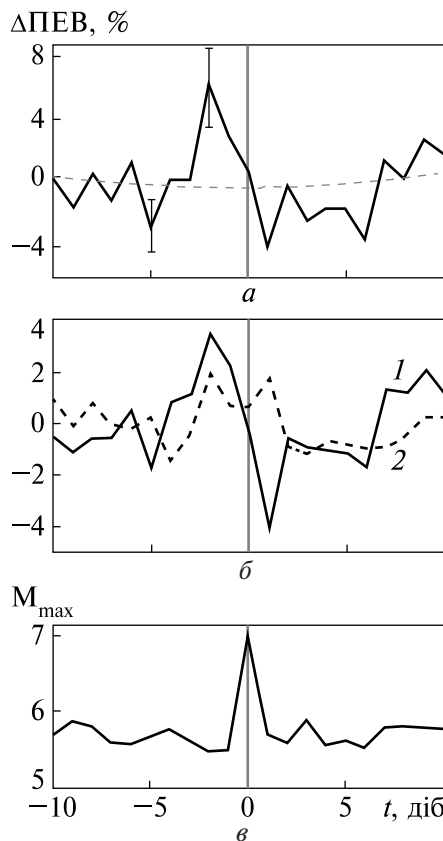


Рис. 4. Середні зміни ПЕВ над осередками сильних ЗТ (локальний ефект): а — первинний результат, б — істинний локальний ефект (крива 1) у порівнянні з глобальним ефектом (крива 2), в — зміни сейсмічної активності

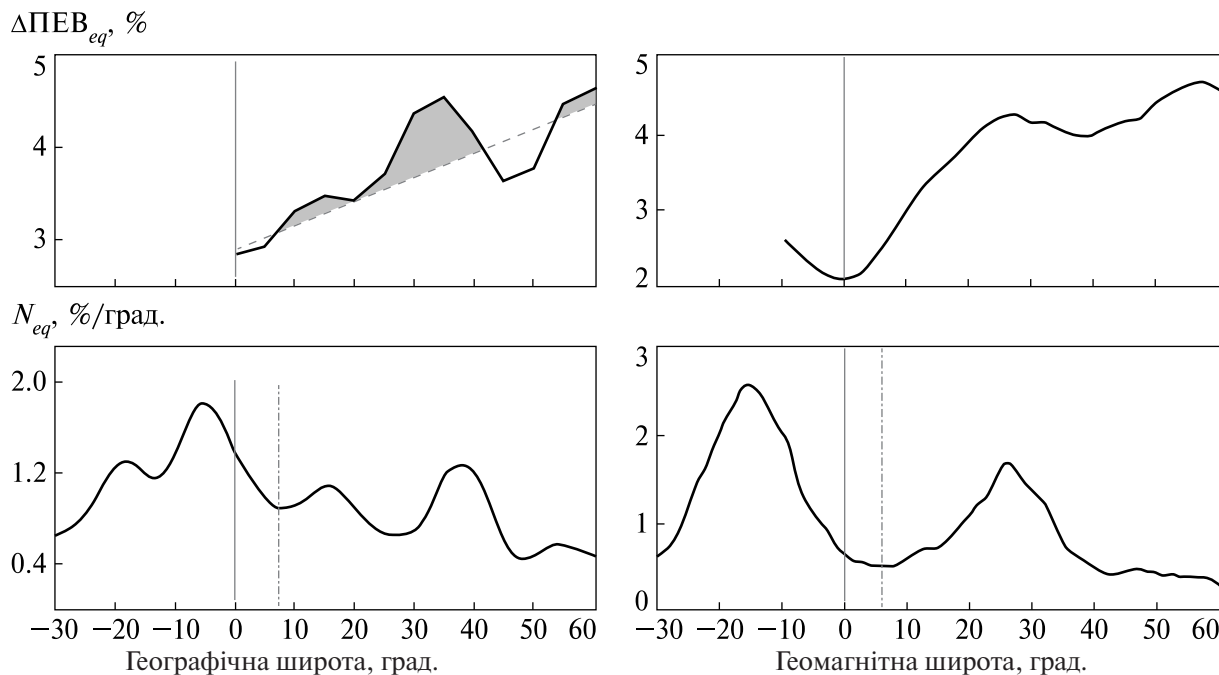


Рис. 5. Широтний розподіл кількості N_{eq} ЗТ з $M \geq 4$ (доля ЗТ у відсотках на градус широти) у зимові сезони 2012–2018 рр. та широтні зміни ΔPEV_{eq} . Сіра вертикальна лінія — екватор, штрих-пунктир — вісь симетрії широтного розподілу ЗТ, штрихова лінія — широтний тренд ΔPEV_{eq}

Встановлений ефект є достовірним для статистичної значущості $p < 0.1$. Перед цим максимумом та після ЗТ значення ПЕВ дещо зменшені. Відсутність другого, «афтершокового» максимуму є основною відмінністю локального сейсмоіоносферного ефекту від глобального.

Оскільки глобальний ефект проявляється всюди, то він, безумовно, проявляється і в осередку окремого ЗТ від інших сильних ЗТ, тобто ефект на рис. 4, а є сумою локального та глобального ефектів. Щоб отримати істинний локальний ефект, віднімемо від сумарного ефекту глобальний ефект (рис. 4, б). Видно, що чистий локальний ефект з'являється дещо раніше глобального та різко згасає після головного поштовху.

Значення ПЕВ для розрахунку локального ефекту брались поблизу моменту головного поштовху у різні години місцевого часу, що дозволило оцінити окремо сейсмічний ефект для денних (11 випадків) та нічних (10 випадків) умов у іоносфері; результати для одного ЗТ у перехідні години не враховувались. Встановлено, що денний ефект подібний наведеному на рис. 4, а, але

з дещо меншою амплітудою. У нічні години, окрім основного максимуму за дві доби до ЗТ і амплітудою близько 8 %, проявився також слабкий максимум у перший день після ЗТ. Тобто, на відміну від результатів [34], у денні години сейсмоіоносферний ефект також проявляється, але має меншу амплітуду.

Як вже відзначалося в наведеному вище огляді, одним з найвірогідніших механізмів появи іоносферних передвісників ЗТ є вихід на земну поверхню радону — одного з глибинних газів. Фізичні особливості цього механізму найбільш повно розглянуто в роботі [13]. Оскільки вихід радону на земну поверхню має певні просторові особливості, можна додатково перевірити реальність радонового механізму шляхом зіставлення просторових особливостей еманції радону та просторових особливостей аномалій в іоносфері. На жаль, безперервні глобальні спостереження радону у наш час не проводяться, тому будемо порівнювати відомі просторові особливості еманції радону (підвищений рівень у сейсмоактивних регіонах, зонах серединно-океанічних

хребтів та вздовж лінеаментів) та просторові особливості сейсмо-іоносферних збурень.

Перевірка радонового механізму сейсмо-іоносферного ефекту. Добре відомо [9, 26, 35], що кількість ЗТ у цілому зменшується від екватора до полюса. Особливості широтного розподілу ЗТ уздовж географічної широти полягають у тому, що центр симетрії сейсмічності зміщений майже на 10° у бік північної півкулі, а також у наявності основних максимумів сейсмічності на $35...40^\circ$ пн. ш. та на $10...20^\circ$ пд. ш. та кількох слабких максимумів. У геомагнітних координатах розподіл ЗТ по широті більш «впорядкований» і має лише два максимуми, також зміщені на північ. Розглянемо широтну залежність сейсмічності для вибраних інтервалів часу та порівняємо її з аналогічними змінами $\Delta\text{ПЕВ}_{eq}$. Результати розрахунків наведено на рис. 5.

Видно, що отримані широтні зміни кількості ЗТ добре відображають відомі з літератури особливості широтних варіацій сейсмічності, а саме поступове збільшення кількості ЗТ від полюса до екватора, зміщення центра симетрії на північ, наявність локальних широтних максимумів, найбільші з яких припадають на $35...40^\circ$ пн. ш. та 10° пд. ш. У розподілі ЗТ по геомагнітних широтах замість кількох максимумів спостерігається лише два: на $22...32^\circ$ пн. ш. та $10...18^\circ$ пд. ш. Положення широтних максимумів $\Delta\text{ПЕВ}_{eq}$ добре відповідає положенню максимумів сейсмічності в обох системах координат. Поступове збільшення значень $\Delta\text{ПЕВ}_{eq}$ від екватора до полюса та зменшення $\Delta\text{ПЕВ}_{eq}$ майже до нуля поблизу геомагнітного екватора пояснюється залежністю механізму формування іоносферного ефекту від вертикальної складової геомагнітного поля, а також, як відзначено вище, значним зменшенням регулярних значень ПЕВ при наближенні до аврального овалу.

Підсилення сейсмо-іоносферного ефекту в зонах серединно-океанічних хребтів і сейсмоактивних поясах демонструє рис. 6. На рисунку показано довготну залежність вказаного ефекту уздовж географічної широти 40° , що припадає приблизно на широту максимальних значень сейсмо-іоносферного ефекту (див. рис. 3). Максимуми спостерігаються на довготах Середин-

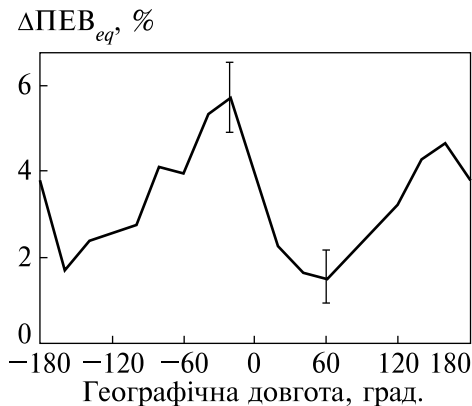


Рис. 6. Довготна залежність сейсмо-іоносферного ефекту на $\varphi = 40^\circ$ пн. ш.

но-Атлантичного хребта ($\sim 30^\circ$ зх. д.) та сейсмічного поясу поблизу Японських островів та прилеглої акваторії Тихого океану ($140...150^\circ$ сх. д.), що добре відповідають зонам підвищених потоків глибинних газів. Для більш детальної оцінки просторової неоднорідності сейсмо-іоносферного ефекту розглянемо планетарний розподіл локальних аномалій $\Delta\text{ПЕВ}_{eq}$, отриманих після виключення повільних змін $\Delta\text{ПЕВ}_{eq}$ з широтою та довготою (рис. 7, верхня панель). Видно, що локальні аномалії вибудовуються у діагональні послідовності («лінеаменти»), частина яких (але не всі) відповідають сейсмічним поясам Землі.

У відомих нам публікаціях просторове положення лінеаментів наведено для окремих територій [2, 7, 20], що не дозволяє використовувати їх для порівняння. Тому розглянемо результати сейсмічної томографії мантії Землі. На нижній панелі рис. 7 наведено просторовий розподіл високошвидкісних та низькошвидкісних аномалій сейсмічних хвиль (зі спрощеннями — лише положення максимумів та мінімумів) за даними [22]. Високошвидкісні аномалії відповідають холоднішим, низькошвидкісні — гарячішим ділянкам мантії. Видно, що тут також наявні діагональні послідовності, основні з яких на рисунку підкреслено тонкими штриховими лініями, що дає підстави вважати іоносферні «лінеаменти» не випадковими та пов'язаними з процесами у твердих оболонках Землі. Між процесами у мантії та аномаліями електронної концентрації в іоносфері — довгий ланцюг складних фізичних

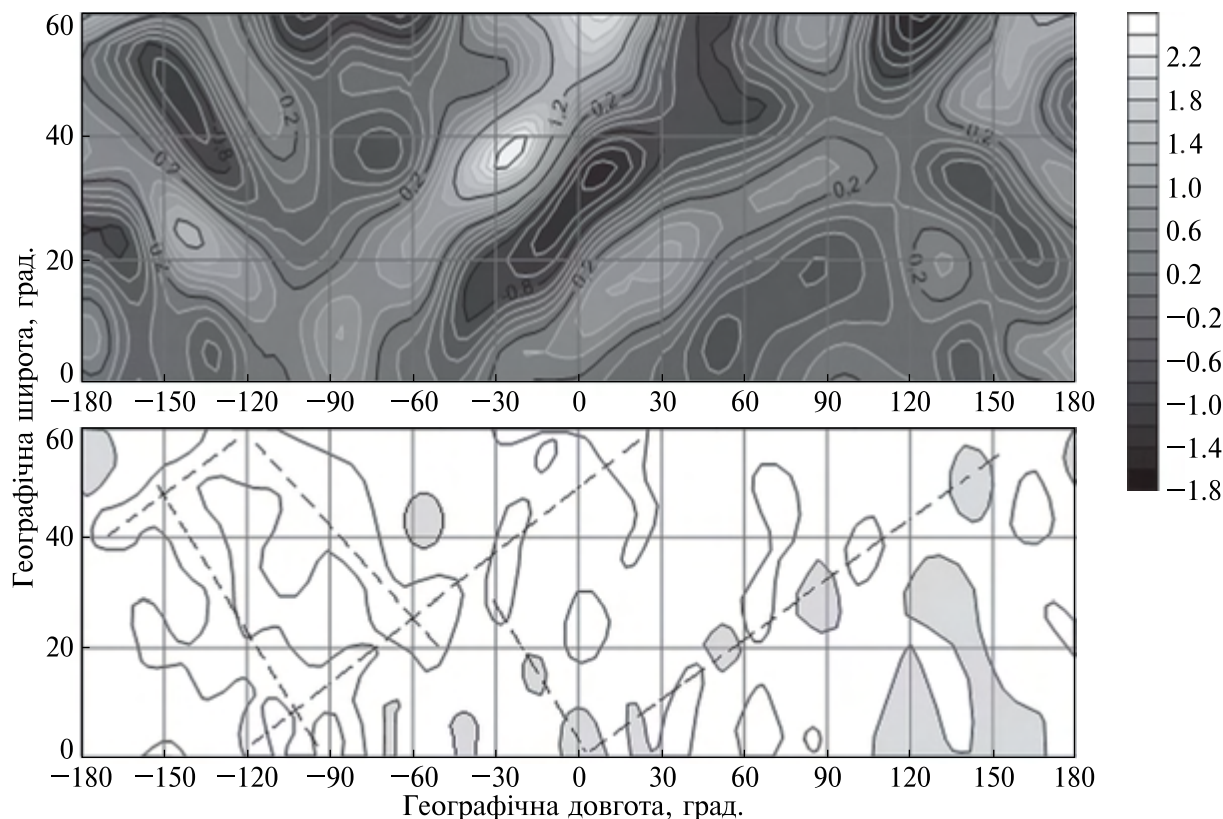


Рис. 7. Діагональні елементи просторового розподілу: зверху — аномалій ПЕВ іоносфери; знизу — позитивних (сірий колір) та негативних (білий колір) аномалій швидкості сейсмічних хвиль у мантії (за даними [22]). Штрихова лінія — основні діагональні елементи

процесів, тому на цьому етапі досліджень обмежимося лише констатацією подібності діагональних елементів у мантії й іоносфері та не будемо проводити їхнього детального зіставлення, тим більше пропонувати уможлядні механізми зв'язку. Відзначимо лише, що потоки глибинних газів, у принципі, можуть залежати від умов у мантії та земній корі, тому глибинний радон — індикатор не лише окремих землетрусів, а цілої низки складних процесів у земних надрах.

Таким чином, усі порівняння свідчать про не-випадковий характер просторових особливостей сейсмо-іоносферного ефекту та його зв'язок з процесами у земній корі. Відзначимо також, що встановлена особливість часових змін ПЕВ під час сейсмічних подій, а саме обов'язкове формування негативних відхилень ПЕВ (по відношенню до фонового рівня) після ЗТ можна пов'язати з тим, що швидкий вихід радону на поверхню

утворює його тимчасовий дефіцит у приповерхневому ґрунті, тому потрібен деякий час для повернення об'ємної активності радону до звичних значень. В осередках сильних ЗТ, як показує рис. 4, б, цей процес більш виражений через значні зміни проникності ґрунту під час ЗТ.

ОБГОВОРЕННЯ

Отримані результати є першою спробою оцінити глобальні іоносферні наслідки сейсмічних подій. Подібні результати у відомих нам наукових публікаціях відсутні, що не дозволяє провести безпосереднє порівняння.

Використання іоносферних карт, що охоплюють значну частину земної кулі, показало: проблема не обмежується власне сейсмо-іоносферною взаємодією, а включає також інші літосферні процеси, які відбуваються в зонах серединно-океанічних хребтів і лінементів, що мар-

кують розломи, зони підвищеної трищівуватості та розущільнення (відповідно, зони підвищеної проникності) земної кори. Єдиним фізичним фактором, що пов'язує ці літосферні об'єкти, є суттєво неоднорідний у просторі та часі потік глибинних газів, насамперед радону. Таким чином, «радоновий» механізм, запропонований раніше для пояснення локальних іоносферних збурень над осередками ЗТ [13, 15, 28, 31], можна розглядати як один із важливих механізмів літосферно-іоносферної взаємодії в цілому. При цьому підвищена об'ємна активність радону може спостерігатися не лише на територіях, що мають відомі літологічні (геологічні) об'єкти (осередки ЗТ, розломи, серединно-океанічні хребти), але й зони підвищеної проникності, які можуть не мати очевидних відповідностей серед геологічних об'єктів. З огляду на різноманітність літосферних об'єктів і процесів, з якими можна пов'язати «радоновий» механізм, він забезпечує *безперервність* процесу літосферно-іоносферної взаємодії з періодичними підсиленнями різного просторового масштабу.

Принципово новим є також розгляд широтної залежності сейсмо-іоносферного ефекту у географічній та геомагнітній системах координат, що виявилася близькою до широтних особливостей сейсмічності. Розглянемо це питання більш детально.

Як вже відзначалося, у середньому кількість ЗТ збільшується від полюсів до екватора, має локальні максимуми на середніх широтах північної півкулі та низьких широтах південної півкулі, а центр симетрії сейсмічності зміщений на північ. Збільшення кількості ЗТ від полюсів до екватора зазвичай пояснюють впливом ротаційного режиму Землі на тектонічні процеси [9, 26, 27], при цьому переважна роль геомагнітної системи координат пояснюється нахилом осі обертання речовин рідкого ядра Землі відносно осі обертання Землі, що проходить через географічні полюси. Зміщення на північ від екватора осі симетрії епіцентрів ЗТ також є результатом впливу геомагнітного поля, а саме відповідним зміщенням центра реального магнітного диполя [26, 27]. Тобто, одні й ті ж фізичні процеси у мантії та ядрі впливають як на формування магнітного

поля Землі, так і на сейсмічність (землетруси як елемент глобального електричного кола [27, 33]).

Встановлені широтні особливості сейсмо-іоносферного ефекту, що добре збігаються з відповідними залежностями кількості ЗТ, ще більше розширюють коло взаємопов'язаних процесів. Фактично проявляється єдиний ланцюг процесів від ядра Землі до іоносфери, що свідчить про єдність усіх шарів як у межах твердої Землі, так і в різних шарах її повітряної оболонки, про єдність процесів у системі Земля — атмосфера — іоносфера — магнітосфера [18, 21].

Складніше пояснити зменшення кількості ЗТ поблизу екватора. Якби сейсмічний та, як наслідок, сейсмо-іоносферний ефект контролювалися лише ротаційним режимом рідкого ядра [9, 26, 27], вісь обертання якого нахилена по відношенню до осі обертання Землі, слід було б очікувати максимальних ефектів на геомагнітному екваторі. Наявність максимумів, зміщених від екватора до середніх широт, може бути результатом впливу зовнішніх сил. Зокрема, розподіл енергії по широті у твердій оболонці Землі демонструє максимуми на широтах $\pm 45^\circ$ для припливних сил і на широтах $\pm 23^\circ$ для прецесії та коливань полюса, тоді як у районі екватора теорія передбачає локальний мінімум [12, 35].

Але наведені вище теоретичні результати стосуються твердої оболонки Землі в географічній системі координат, тому вони не пояснюють повною мірою провідну роль геомагнітної системи координат у сейсмічних процесах. Тому можна припустити інший механізм — наявність у земному ядрі кільцевого струму уздовж геомагнітного екватора (екваторіальний електроджет) у дипольному геомагнітному полі, який знижує потік глибинних газів з ядра у мантію. Оскільки глибинні гази розглядаються як важливий чи навіть визначальний чинник тектонічних процесів у земній корі, що завершуються землетрусом [10, 23, 32], це призведе до відносної сейсмічної «тиші» уздовж геомагнітного екватора. Такий екваторіальний електроджет може бути елементом механізму формування магнітного поля Землі чи зумовлений іншими процесами, зокрема, розбіжністю кутової швидкості рідкого та твердого ядер Землі по відношенню до нижньої

мантії [30], що призведе до появи процесів їхньої взаємодії.

Останнім часом вказаним процесам взаємодії на межі мантія — зовнішнє ядро та внутрішнього та зовнішнього ядра приділяється багато уваги. За умови несферичності оболонки і ексцентричності положення земного ядра ці процеси не лише стають вагомим джерелом припливу тепла з надр Землі, але й забезпечують ефективне збудження системи оболонки зовнішнім гравітаційним впливом [1, 8, 11]). На думку автора роботи [1], лише так можна пояснити циклічний характер тектонічних та інших природних процесів, що черпають енергію земних надр. Якщо залежність процесів у ядрі та нижній мантії від зовнішнього впливу буде підтверджено подальшими дослідженнями, це певною мірою розміє поділ процесів на ендогенні та екзогенні, оскільки ендогенні процеси несуть на собі ритми екзогенних процесів.

Як бачимо, розгляд такого окремого питання, як сейсмо-іоносферний ефект, привів нас до питання взаємодії всіх земних оболонки, від ядра до верхньої атмосфери та магнітосфери, а також до можливої їхньої залежності від зовнішніх (космічних) чинників. Отримані результати дають вагомий підтвердження точки зору, що Земля разом з її оболонками (підсистемами) та навколоземне середовище утворюють єдину природну відкриту нелінійну систему [18, 21]. При цьому мова йде не лише про обмін енергією між підсистемами, але й про наявність спільних чинників, що визначають динаміку різних оболонки Землі.

ВИСНОВКИ

1. Дослідження з використанням карт ПЕВ іоносфери демонструють, що сейсмо-іоносферний ефект має загальнопланетарний характер. Часові варіації ПЕВ поблизу моментів сильних ЗТ (глобальний ефект) складаються з двох максимумів: передвісника та «афтершокового» максимуму. У варіаціях над осередками ЗТ реєструється лише передвісник, максимум після ЗТ зазвичай відсутній. У нічні години зміни ПЕВ над

осередками ЗТ приблизно вдвічі більші (у середньому до 8 %), ніж удень. Завжди (локально та глобально) за позитивним сплеском ПЕВ протягом кількох діб спостерігаються зменшені значення ПЕВ. Час прояву передвісника — від 1 до 6 діб до ЗТ, переважно за дві доби до ЗТ.

2. Зона максимальної амплітуди сейсмо-іоносферного ефекту припадає на середні широти, особливо 35...40° пн. ш., а у межах цієї зони — на довготи поблизу 30° зх. д. (Серединно-океанічний хребет) та 140...150° сх. д. (Японські острови та прилегла акваторія Тихого океану).

3. Широтні варіації амплітуди сейсмо-іоносферного ефекту добре збігаються з широтним розподілом ЗТ як у географічній, так і геомагнітній системах координат. Зміни кількості ЗТ та, відповідно, ефекту в іоносфері за геомагнітними координатами більш впорядковані, що свідчить про важливий вплив на сейсмічність тих самих процесів на межі рідкого ядра та нижньої магнії, які зумовлюють формування магнітного поля Землі.

4. Крім сейсмічних поясів та зон серединно-океанічних хребтів, зростання ПЕВ зафіксовано уздовж так званих лінеаментів, що маркують ослаблені зони земної кори з підвищеним потоком глибинних газів. Отримані результати свідчать на користь «радонового» механізму сейсмо-іоносферного ефекту та опосередковано підтверджують роль цього процесу у формуванні загальнопланетарних особливостей сейсмічності.

5. Отримані результати, разом з відомими даними про широтний розподіл землетрусів, свідчать про єдність процесів від земного ядра до навколоземного простору.

Роботу виконано за фінансової підтримки Національного фонду досліджень України, проєкт 2020.02/0015 «Теоретичні та експериментальні дослідження глобальних збурень природного і техногенного походження в системі Земля — атмосфера — іоносфера». Робота також частково підтримувалась у рамках держбюджетних НДР, заданих МОН України (номери держреєстрації 0121U109881 та 0121U109882).

ЛІТЕРАТУРА

1. Баркин Ю. В. Объяснение эндогенной активности планет и спутников и ее цикличности, *Изв. Рос. акад. естеств. наук, сек. наук о Земле*. 2002. Вып. 9. С. 45—97.
2. Бондур В. Г., Зверев А. Т. Физическая природа линеаментов, регистрируемых на космических изображениях при мониторинге сейсмоопасных территорий. *Совр. пробл. дистан. зондирования Земли из космоса*. 2006. 2, Вып. 3. С. 177—183.
3. Войтов Г. И. О холодной дегазации метана в тропосферу Земли. *Теор. и региональные проблемы геодинамики. Тр. Геолог. ин-та РАН*. 1999. Вып. 515. С. 242—251.
4. Горькавый Н. Н., Трапезников Ю. А., Фридман А. М. О глобальной составляющей сейсмического процесса и ее связи с наблюдаемыми особенностями вращения Земли. *Докл. РАН. Геофизика*. 1994. 338, № 4. С. 525—527.
5. Добровольский И. П. *Теория подготовки тектонического землетрясения*. Москва: Наука, 1991. 224 с.
6. Захаров І. Г., Черногор Л. Ф. Вплив глобальної сейсмічної активності на процеси в атмосфері й іоносфері. *Космічна наука і технологія*. 2021. 27, № 5. С. 19—34. DOI: <https://doi.org/10.15407/knit2021.04.000>.
7. Кузьмин Ю. О. Современная геодинамика разломных зон. *Физ. Земли*. 2004. № 10. С. 95—111.
8. Левин Б. В. Роль движений внутреннего ядра Земли в тектонических процессах. *Фундаментальные проблемы общей тектоники*. Москва: Науч. мир, 2001. С. 444—460.
9. Левин Б. В., Чирков Е. Б. Особенности широтного распределения сейсмичности и вращение Земли. *Вулканология и сейсмология*. 1999. № 6. С. 65—69.
10. Летников Ф. А. Дегазация земли как глобальный процесс самоорганизации. *Дегазация Земли: геодинамика, геофлюиды, нефть и газ. Материалы межд. конф.* Москва: ГЕОС, 2002. С. 6—7.
11. Летников Ф. А. Об одном из возможных источников тепловой энергии эндогенных процессов Земли. *ДАН*. 2004. 398, № 6. С. 792—794.
12. Павлов В. П. Теория возмущения для тензора напряжений в Земле. *Теор. и мат. физика*. 2004. 141, № 4. С. 117—130.
13. Пулинец С. А., Узун Д. П., Карелин А. В., Давиденко Д. В. Физические основы генерации краткосрочных предвестников землетрясений. Комплексная модель геофизических процессов в системе литосфера – атмосфера – ионосфера – магнитосфера, инициируемых ионизацией. *Геомagnetизм и аэрономия*. 2015. 55, № 4. С. 1—19. DOI: 10.7868/S0016794015040136.
14. Сайт VolcanoDiscovery. URL: <https://www.volcanodiscovery.com/earthquakes/global-seismic-activity-level.html/> (дата звернення: 27.04.2022).
15. Спивак А. А., Кожухов С. А., Сухоруков С. В., Харламов В. А. Эманация радона как индикатор интенсивности межгеосферных взаимодействий на границе земная кора – атмосфера. *Физ. Земли*. 2009. № 2. С. 34—48.
16. Сывороткин В. Л. *Озоновый слой, дегазация Земли, рифтогенез и глобальные катастрофы*. Москва: Геоинформмарк, 1994. 68 с.
17. Тertyshnikov A. V. Оценка практической значимости геомагнитных предвестников сильных землетрясений. *Гелиогеофиз. исслед.* 2013. Вып. 3. С. 63—70.
18. Черногор Л. Ф. Физика Земли, атмосферы и геокосмоса в свете системной парадигмы. *Радиофизика и радиоастрономия*. 2003. 8, № 1. С. 59—106.
19. Черногор Л. Ф. Возможность генерации квазипериодических магнитных предвестников землетрясений. *Геомagnetизм и аэрономия*. 2019. 59, № 3. С. 400—408. DOI: 10.1134/S0016794019030064.
20. Arellano-Baeza A. A., Zverev A. T., Malinnikov V. A. Study of changes in the lineament structure, caused by earthquakes in South America by applying the lineament analysis to the Aster (Terra) satellite data. *Adv. Space Res.* 2006. 37, № 4. P. 690—697.
21. Chernogor L. F., Rozumenko V. T. Earth – Atmosphere – Geospace as an open nonlinear dynamical system. *Radio Physics and Radio Astronomy*. 2008. 13, № 2. P. 120—137.
22. Courtillot V., Davaille A., Besse J., Stock J. Three distinct types of hotspots in the Earth’s mantle. *Earth and Planet. Sci. Lett.* 2003. 205. P. 295—308.
23. Gufeld I. L., Matveeva M. I., Novoselov O. N. Why we cannot predict strong earthquakes in the Earth’s crust. *Geodynamics & Tectonophysics*. 2011. 2, № 4. P. 378—415. DOI:10.5800/GT2011240051.
24. Heki K. Ionospheric electron enhancement preceding the 2011 Tohoku-Oki earthquake. *Geophys. Res. Lett.* 2011. 38. L17312. DOI:10.1029/2011GL047908.
25. Hobara Y., Parrot M. Ionospheric perturbations linked to a very powerful seismic event. *J. Atmos. Terr. Phys.* 2005. 67. P. 677—685. DOI:10.1016/j.jastp.2005.02.006.
26. Khachikjan G. Spatial earthquake statistics in geomagnetic coordinates. *Proc. Int. earthquake symp.* Kocaeli, Turkey. 2009. С. 407—413. URL: <http://kocaeli2009.kocaeli.edu.tr/fullpaper09.pdf> (дата звернення: 27.04.2022).

27. Khachikyan G. Ya., Zhakupov N. S., Kadyrhanova N. Zh. Geomagnetic conjugacy of modern tectonic structures. *Geodynamics & Tectonophysics*. 2013. **4**, № 2. P. 187—195. DOI:10.5800/GT2013420097.
28. Liperovsky V. A., Meister C.-V., Liperovskaya E. V., Davidov V. F., Bogdanov V. V. On the possible influence of radon and aerosol injection on the atmosphere and ionosphere before earthquakes. *Natural Hazards and Earth System Sci.* 2005. **5**, № 6. P. 783—789. DOI: <https://doi.org/10.5194/nhess-5-783-2005>.
29. Liu J. Y., Chen Y. L., Chuo Y. J., Chen C. S. A statistical investigation of preearthquake ionospheric anomaly. *J. Geophys. Res.* 2006. **111**. A05304. DOI:10.1029/2006.
30. Livermore P. W., Hollerbach R., Jackson A. Electromagnetically driven westward drift and inner-core superrotation in Earth's core. *Proc. Nat. Acad. Sci. USA (PNAS)*. 2013. Sept. 16. P. 1—5. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.1307825110>.
31. Ouzounov D., Freund F. Mid-infrared emission prior to strong earthquakes analyzed by remote sensing data. *Adv. Space Res.* 2004. **33**. P. 268—273. DOI:10.1016/S0273-1177(03)00486-1.
32. Pavlenkova N. I. Fluids-rotation conception of global geodynamics. *Bull. Soc. Geol. It.* 2005. *Volume Speciale No. 5*. P. 9—22.
33. Pulnits S.; Khachikyan G. The global electric circuit and global seismicity. *Geosciences*. 2021. **11**. P. 491. DOI: <https://doi.org/10.3390/geosciences11120491>.
34. Pulnits S., Tsidilina M., Ouzounov D., Davidenko D. From Hector Mine M7.1 to Ridgecrest M7.1 earthquake. A look from a 20-year perspective. *Atmosphere*. 2021. **12**, № 262. 16 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/atmos1202026>.
35. Sun W. Seismic energy distribution in latitude and a possible tidal stress. *Phys. Earth and Planet. Interiors*. 1992. **71**. P. 205—216. DOI:10.1016/0031-9201(92)90077-9.
36. Zakharov I. G., Chernogor L. F. Ionosphere as an indicator of processes in the geospace, troposphere, and lithosphere. *Geomagn. Aeron.* 2018. **58**, № 3. P. 430—437. DOI:10.1134/S0016793218030167.

REFERENCES

1. Barkin Yu. V. (2002). Explanation of the endogenous activity of planets and satellites and its cyclicity, *Izvestiya Rus. Acad. Natural Sci., Geosci. Section*, **9**, 45—97 [in Russian].
2. Bondur V. G., Zverev A. T. (2006). Physical nature of lineaments recorded on space images during monitoring of seismically hazardous areas. *Modern Problems of Remote Sensing of the Earth from Space*, **2**, № 3, 177—183 [in Russian].
3. Voitov G. I. (1999). On cold degassing of methane into the Earth's troposphere. *Teor. and regional problems of geodynamics. Trudy Geolog. In-te Rus. Acad. Sci.*, is. 515. Moscow: Nauka, 242—251 [in Russian].
4. Gorkavy N. N., Trapeznikov Yu. A., Fridman A. M. (1994). On the global component of the seismic process and its relationship with the observed features of the Earth's rotation. *Doklady Rus. Acad. Sci., Geophysics*, **338**, № 4, 525—527 [in Russian].
5. Dobrovolsky I. P. (1991). *Theory of tectonic earthquake preparation*. Moscow: Nauka, 224 p. [in Russian].
6. Zakharov I. G., Chornogor L. F. (2021). Influence of global seismic activity on processes in the atmosphere and ionosphere. *Space Science and Technology*, **27**, № 5, 19—34 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.15407/knit2021.04.000>.
7. Kuzmin Yu. O. (2004). Modern geodynamics of fault zones. *Physics of the Earth*, **10**, 95—111 [in Russian].
8. Levin B. V. (2001). *The role of the Earth's inner core movements in tectonic processes*. Fundamental problems of general tectonics. Moscow: Scientific world Publ., 444—460 [in Russian].
9. Levin B. V., Chirkov E. B. (1999). Latitudinal distribution of seismicity features and the rotation of the Earth. *J. Volcanology and Seismology*, **6**, 65—69 [in Russian].
10. Letnikov F. A. (2002). Earth degassing as a global process of self-organization. *Degassing of the Earth: geodynamics, geofluids, oil and gas (Proc. of the Int. Conf.)*. Moscow: GEOS Publ., P. 6—7 [in Russian].
11. Letnikov F. A. (2004). About one of the possible sources of thermal energy of endogenous processes of the Earth. *Doclady Rus. Acad. Sci.*, **398**, № 6, 792—794 [in Russian].
12. Pavlov V. P. (2004). Perturbation theory for the stress tensor in the Earth. *Theor. and Mat. Physics*, **141**, № 4, 117—130 [in Russian].
13. Pulnits S. A., Ouzounov D. P., Karelin A. V., Davidenko D. V. (2015). Physical bases of the generation of short term earthquake precursors: A complex model of ionization-induced geophysical processes in the lithosphere – atmosphere – ionosphere – magnetosphere system. *Geomagn. Aeron.*, **55**, № 4, 521—538. DOI:10.1134/S0016793215040131.
14. Volcanodiscovery. URL: <https://www.volcanodiscovery.com/earthquakes/global-seismic-activity-level.html> (Last accessed: 27.04.2022).
15. Spivak A. A., Kozhukhov S. A., Sukhorukov S. V., Kharlamov V. A. (2009). Radon emanation as an indicator of the intensity of intergeospheric interactions at the Earth's crust-atmosphere interface. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, **45**, 118—133 [in Russian].
16. Syvorotkin V. L. (1994). *Ozone Layer, Earth Degassing, Rifting and Global Catastrophes*. Moscow: Geoinformmark Publ., 68 p. [in Russian].

17. Tertyshnikov A. V. (2013). Estimation of the practical significance of geomagnetic precursors of strong earthquakes. *Helio-geophysical Res.*, **3**, 63–70 [in Russian].
18. Chernogor L. F. (2003). Physics of the Earth, atmosphere and geocosmos in the light of the systemic paradigm. *Radio Physics and Radio Astronomy*, **8**, № 1, 59–106 [in Russian].
19. Chernogor L. F. (2019). Possible Generation of Quasi-Periodic Magnetic Precursors of Earthquakes. *Geomagn. Aeron.*, **59**, № 3, 374–382. DOI: 10.1134/S001679321903006X.
20. Arellano-Baeza A. A., Zverev A. T., Malinnikov V. A. (2006). Study of changes in the lineament structure, caused by earthquakes in South America by applying the lineament analysis to the Aster (Terra) satellite data. *Adv. Space Res.*, **37**, № 4, 690–697.
21. Chernogor L. F., Rozumenko V. T. (2008). Earth — Atmosphere — Geospace as an open nonlinear dynamical system. *Radio Physics and Radio Astronomy*. **13**, № 2. P. 120–137.
22. Courtillot V., Davaille A., Besse J., Stock J. (2003). Three distinct types of hotspots in the Earth's mantle. *Earth and Planet. Sci. Lett.*, **205**, 295–308.
23. Gufeld I. L., Matveeva M. I., Novoselov O. N. (2011). Why we cannot predict strong earthquakes in the Earth's crust. *Geodynamics & Tectonophysics*, **2**, № 4, 378–415. DOI: 10.5800/GT2011240051.
24. Heki K. (2011). Ionospheric electron enhancement preceding the 2011 Tohoku-Oki earthquake. *Geophys. Res. Lett.*, **38**, L17312. DOI: 10.1029/2011GL047908.
25. Hobara Y., Parrot M. (2005). Ionospheric perturbations linked to a very powerful seismic event. *J. Atmos. Terr. Phys.*, **67**, 677–685. DOI:10.1016/j.jastp.2005.02.006.
26. Khachikjan G. (2009). Spatial earthquake statistics in geomagnetic coordinates. *Proc. of Intern. earthquake symposium. Kocaeli. Turkey*, 407–413. URL: <http://kocaeli2009.kocaeli.edu.tr/fullpaper09.pdf> (Last accessed: 27.04.2022).
27. Khachikyan G. Ya., Zhakupov N. S., Kadyrkhanova N. Zh. (2013). Geomagnetic conjugacy of modern tectonic structures. *Geodynamics & Tectonophysics*, **4**, № 2, 187–195. DOI: 10.5800/GT2013420097.
28. Liperovsky V. A., Meister C.-V., Liperovskaya E. V., Davidov V. F., Bogdanov V. V. (2005). On the possible influence of radon and aerosol injection on the atmosphere and ionosphere before earthquakes. *Natural Hazards and Earth System Sci.*, **5**, № 6, 783–789. DOI: <https://doi.org/10.5194/nhess-5-783-2005>.
29. Liu J. Y., Chen Y. I., Chuo Y. J., Chen C. S. (2006). A statistical investigation of preearthquake ionospheric anomaly. *J. Geophys. Res.*, **111**, A05304. DOI: 10.1029/2006.
30. Livermore P. W., Hollerbach R., Jackson A. (2013). Electromagnetically driven westward drift and inner-core superrotation in Earth's core. *Proc. Nat. Acad. Sci. USA (PNAS)*, Sept. 16, 1–5. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.1307825110>.
31. Ouzounov D., Freund F. (2004). Mid-infrared emission prior to strong earthquakes analyzed by remote sensing data. *Adv. Space Res.*, **33**, 268–273. DOI:10.1016/S0273-1177(03)00486-1.
32. Pavlenkova N. I. (2005). Fluids-rotation conception of global geodynamics. *Bull. Soc. Geol. It. Volume Speciale*, **5**, 9–22.
33. Pulinets S., Khachikyan G. (2021). The global electric circuit and global seismicity. *Geosciences*, **11**, 491. DOI: <https://doi.org/10.3390/geosciences11120491>.
34. Pulinets S., Tsidilina M., Ouzounov D., Davidenko D. (2021). From Hector Mine M7.1 to Ridgecrest M7.1 earthquake. A look from a 20-year perspective. *Atmosphere*, **12** (262), 16 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/atmos1202026>.
35. Sun W. (1992). Seismic energy distribution in latitude and a possible tidal stress. *Phys. Earth and Planet. Interiors*, **1**, 205–216. DOI: 10.1016/0031-9201(92)90077-9.
36. Zakharov I. G., Chernogor L. F. (2018). Ionosphere as an indicator of processes in the geospace, troposphere, and lithosphere. *Geomagn. Aeron.*, **58**, № 3, 430–437. DOI: 10.1134/S0016793218030167.

Стаття надійшла до редакції 13.05.2022

Після доопрацювання 24.05.2022

Прийнято до друку 25.05.2022

Received 13.05.2022

Revised 24.05.2022

Accepted 25.05.2022

I. G. Zakharov, Senior Researcher, PhD in Phys.&Math., Winner of USSR Council of Ministers Prize

E-mail: giz-zig@ukr.net

L. F. Chernogor, Head of the Department of Space Radiophysics, Dr. Sci. in Phys. & Math., Professor

ORCID ID: 0000-0001-5777-2392

E-mail: Leonid.F.Chernogor@gmail.com

V. N. Karazin Kharkiv National University

4, Svoboda Sq., Kharkiv, 61022 Ukraine

GLOBAL AND LOCAL EFFECTS OF SEISMIC ACTIVITY IN THE IONOSPHERE

We considered ionospheric effects of powerful seismic events using total electron content (TEC) maps of the ionosphere (<http://www.aiub.unibe.ch/download/CODE/>) for the northern hemisphere, except the polar region, in the winter seasons of 2012–2018. It is shown that the seismic-ionospheric effect is global, which is superimposed by local effects over the epicenters of individual earthquakes (EQ). Temporal TEC variations near the time of strong EQs at a great distance from their epicenters (global effect) consist of two maxima: the precursor and the «aftershock» maximum. In TEC variations over the EQ epicenter (local effect), only a precursor is usually registered, the amplitude of which at night (on average, ~ 8 %) is about twice as high as during the day. Always (locally and globally) after a positive surge in TEC, its reduced values are observed for several days. The maximum amplitude zone of the seismic-ionospheric effect belongs to the middle latitudes, especially 35...40° N, and within this zone at longitudes near 30° W (Mid-Atlantic ridge) and 140...150° E (Japanese islands and adjacent waters of the Pacific Ocean). Latitudinal amplitude maxima of the seismic-ionospheric effect are in good agreement with the latitudinal maxima of the EQ number in both geographic and geomagnetic coordinate systems. Changes in the EQ number and, consequently, the effect in the ionosphere on geomagnetic coordinates are more ordered, which indicates a significant impact on the seismicity of the same processes at the boundary of the liquid core and lower mantle, which form the Earth's magnetic field. In addition to seismic belts and zones of mid-ocean ridges, an increase in TEC has been recorded along the so-called lineaments, marking the weakened zones of the Earth's crust with increased flows of deep gases. The correspondence between the spatial features of seismicity and the seismic-ionospheric effect testifies in favor of the «radon» mechanism of lithosphere-ionosphere coupling and indirectly confirms the role of deep gases in the formation of seismicity planetary features.

Keywords: ionosphere, seismicity, total electron content, lithosphere-ionosphere coupling, local perturbations, global perturbations.

<https://doi.org/10.15407/knit2022.06.025>
УДК 551.51; 551.511.31

А. К. ФЕДОРЕНКО, старш. наук. співроб., канд. фіз.-мат. наук

ORCID: 0000-0002-2327-9556

E-mail: fedorenkoak@gmail.com

Є. І. КРЮЧКОВ, старш. наук. співроб., канд. техн. наук

ORCID: 0000-0002-9131-3277

E-mail: kryuchkov, ye@gmail.com

О. К. ЧЕРЕМНИХ, зав. відділу, чл.-кор. НАН України

ORCID: 0000-0001-6789-3382

E-mail: oleg.cheremnykh@gmail.com

І. Т. ЖУК, старш. наук. співроб., канд. фіз.-мат. наук

E-mail: zhukigor@gmail.com

Інститут космічних досліджень Національної академії наук України
та Державного космічного агентства України
Проспект Академіка Глушкова 40, к. 4/1, Київ-187, Україна, 03187

ХВИЛЬОВІ ЗБУРЕННЯ АТМОСФЕРИ У ПРОСТОРОВО НЕОДНОРІДНІЙ ТЕЧІЇ

Аналіз вимірювань на супутнику «Dynamics Explorer 2» вказує на тісний зв'язок атмосферних хвильових збурень у полярній термосфері з вітровою циркуляцією. Згідно з супутниковими спостереженнями в областях формування потужних вітрових систем систематично спостерігаються акустико-гравітаційні хвилі (АГХ) великих амплітуд. При цьому азимуті поширення АГХ просторово узгоджуються з напрямками вітрової циркуляції. Хвилі поширюються переважно назустріч вітру, а їхня амплітуда приблизно пропорційна швидкості вітру. З метою пояснення експериментальних даних у роботі теоретично досліджено зміни амплітуд АГХ у горизонтально неоднорідній вітровій течії. Отримано дисперсійне рівняння АГХ у системі відліку середовища, яке рухається з неоднорідною швидкістю. При його отриманні враховано сили інерції, а також зміну фонові густини атмосфери в неоднорідній течії. Показано, що за умови повільної зміни швидкості вітру дійсна частина цього рівняння збігається з дисперсійним рівнянням АГХ для нерухомого середовища. Отримано вираз для зміни амплітуди хвиль в рухомому середовищі, згідно з яким у зустрічному неоднорідному вітрі амплітуда хвиль збільшується приблизно за лінійним законом, що узгоджується з даними супутникових спостережень.

Ключові слова: акустико-гравітаційна хвиля, полярна термосфера, просторово неоднорідна течія.

ВСТУП

У полярній термосфері Землі відбувається тісна взаємодія динамічних процесів різних масштабів. У цих областях на глобальну вітрову циркуляцію, що формується внаслідок поглинання сонячного ультрафіолетового випроміню-

вання, накладаються інші ефекти: 1) залучення нейтральної атмосфери до конвективного руху іоносферної плазми, зумовленого електричними полями магнітосферного походження; 2) розігрівання атмосфери енергійними частинками, що висипаються, і магнітосферно-іоносфер-

Цитування: Федоренко А. К., Крючков Є. І., Черемних О. К., Жук І. Т. Хвильові збурення атмосфери у просторово неоднорідній течії. *Космічна наука і технологія*. 2022. **28**, № 6 (139). С. 25—33. <https://doi.org/10.15407/knit2022.06.025>

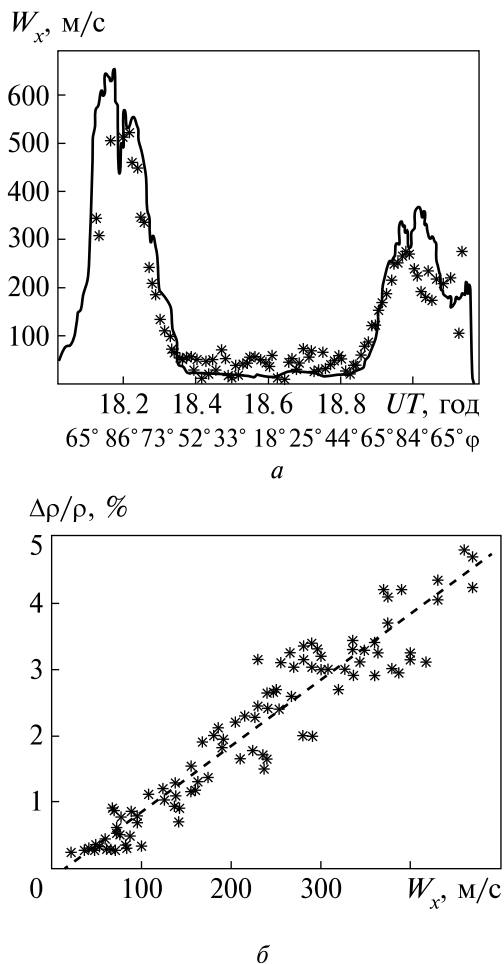


Рис. 1. Зв'язок амплітуд АГХ зі швидкістю вітру за даними супутника «Dynamics Explorer 2»: *а* — швидкість вітру W_x (зірочки) та усереднена амплітуда АГХ у відносних флуктуаціях щільності $10^3 \Delta\rho/\rho$ (суцільна крива) на витку 8257, *б* — залежність амплітуди АГХ $\Delta\rho/\rho$ (%) від швидкості вітру за вимірами на шести витках [6]

ними струмами в областях авроральних овалів. Внаслідок впливу вказаних процесів структура вітрових течій у полярній термосфері є дуже складною і неоднорідною у просторі [11]. Просторова картина вітрів залежить не тільки від сезону і часу доби, як це переважно спостерігається у середніх широтах, а також від процесів магнітосферно-іоносферної взаємодії. Швидкості вітрів у полярній термосфері досягають максимально можливих у земній атмосфері значень і становлять 300...700 м/с [9]. Основний внесок у формування потужних полярних вітрів дає

конвективна складова, яка виникає безпосередньо під впливом магнітосферно-іоносферних процесів. Просторово неоднорідна структура вітру зумовлює специфіку поширення хвиль у такому середовищі. Відомо, що при поширенні хвиль у неоднорідному вітрі відбувається обмін енергією між середовищем та хвилями [10]. Це призводить до зміни амплітуд хвиль, а також формування переважних напрямків їхнього поширення відносно вітру. Відмітимо, що вказані обставини суттєво ускладнюють пошук можливих джерел спостережуваних хвильових збурень у неоднорідному вітрі. Основні високоширотні джерела збурень верхньої атмосфери пов'язані з висипаннями заряджених частинок та дисипацією іоносферних струмів. Максимальне поглинання енергії від цих джерел відбувається у висотному інтервалі 100...200 км, в результаті чого, ймовірно, генеруються АГХ у широкому спектрі частот [7, 14].

Супутникові спостереження вказують на переважання у полярній термосфері АГХ з певними спектральними властивостями та азимутами поширення. Так, частоти АГХ над полярними шапками, визначені на основі прямих супутникових вимірювань, згідно з висновками ряду робіт є близькими до частоти Брента — Вайсяля (БВ) [5, 8]. При наявності різноманітних гіпотетичних джерел цей ефект є незрозумілим, і може вказувати на певну селективну фільтрацію спектру хвиль. У земній атмосфері швидко збільшуються втрати енергії АГХ зі збільшенням висоти за рахунок збільшення молекулярної в'язкості та іонного тертя [13]. Тому вище 200 км АГХ мають швидко загасати у процесі поширення. Водночас у полярній термосфері спостерігаються виражені цуги хвиль, амплітуда яких часто збільшується у напрямку поширення. Останнє неможливо пояснити без врахування додаткового притоку енергії до хвиль від середовища.

З аналізу вимірювань на супутнику «Dynamics Explorer 2» випливає, що поведінка АГХ у полярних областях переважно контролюється вітрами [2]. Цей вітровий контроль проявляється у двох основних ефектах [1, 2]: 1) АГХ систематично поширюються назустріч вітру; 2) спостерігається виражена залежність амплітуд хвиль від

швидкості вітру. Другий ефект проілюстровано на рис. 1. Розподіл швидкості вітру і амплітуди хвильових збурень показано на рис. 1, а на окремому витку супутника. На рис. 1, б наведено сумарну для шести витків залежність амплітуди хвиль від швидкості вітру. Ці експериментальні дані показують, що для інтерпретації спостережуваних властивостей АГХ у полярних областях необхідно врахувати вплив вітру на поширення цих хвиль.

При вивченні поширення АГХ у просторово неоднорідній течії, швидкість якої не залежить від координат, зазвичай переходять у систему відліку рухомого середовища. Відомо, що у цій системі виконуються теоретичні співвідношення АГХ (дисперсійне рівняння, поляризаційні співвідношення та ін.), отримані для нерухомого середовища [4]. У цих співвідношеннях відбувається заміна частоти ω_0 в нерухомій системі відліку на частоту в системі відліку рухомого середовища $\omega = \omega_0 - \mathbf{k}\mathbf{W}$, де \mathbf{k} — хвильовий вектор, \mathbf{W} — швидкість вітру [4]. Подібний підхід можна наближено застосувати, якщо швидкість течії повільно змінюється на масштабі довжини хвилі [10]. В локальному наближенні слабка неоднорідність течії практично не впливає на дисперсію АГХ, а лише на амплітуди хвиль [10]. Зміна амплітуд хвиль у неоднорідних течіях відбувається внаслідок обміну енергією із середовищем. Особливості взаємодії акустико-гравітаційних хвиль з просторово неоднорідними течіями атмосфери досліджено в роботі [6], де використовувалося дисперсійне рівняння АГХ для нерухомого середовища у припущенні, що воно локально виконується в системі відліку рухомого середовища. Зміну амплітуд АГХ у просторово неоднорідній течії атмосфери досліджено з використанням рівняння хвильової дії [3, 6].

В даній роботі розглянуто взаємодію хвиль з неоднорідними течіями атмосфери на основі іншого підходу. Із системи гідродинамічних рівнянь безпосередньо отримано дисперсійне рівняння АГХ в системі відліку середовища, що рухається з неоднорідною швидкістю. При цьому враховано сили інерції та зміни фонові густини атмосфери. В умовах повільної зміни швидкості течії дійсна частина отриманого дисперсійно-

го рівняння збіглася з дисперсійним рівнянням АГХ для нерухомого середовища. З уявної частини дисперсійного рівняння отримано аналітичний вираз, який описує зміну амплітуди АГХ в рухомому середовищі і добре узгоджується зі спостереженнями.

ВИХІДНІ РІВНЯННЯ

Перш ніж розглядати систему диференціальних гідродинамічних рівнянь, що описують хвильові збурення в атмосфері, наведемо деякі загальні міркування щодо переходу в рухому систему відліку. Якщо швидкість стаціонарного вітру змінюється у напрямку поширення вздовж горизонтальної осі x , тоді для нерухомого спостерігача у виразі для повної похідної від швидкості по часу з'являються такі доданки:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}(W_x + v_x) = & \frac{\partial v_x}{\partial t} + W_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_x \frac{\partial W_x}{\partial x} + \\ & + W_x \frac{\partial W_x}{\partial x} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_z \frac{\partial v_x}{\partial z}, \end{aligned} \quad (1)$$

де v_x та v_z — швидкість хвильових флуктуацій об'єму середовища у вертикальному і горизонтальному напрямку, W_x — швидкість вітру. У лінійному наближенні останніми двома доданками нехтуємо. Якщо W_x не змінюється у просторі, тоді права частина виразу (1) обмежується тільки першими двома доданками. Ці доданки дають перенормування частоти $\omega = \omega_0 - k_x W_x$ при переході в систему відліку рухомого середовища. Якщо швидкість вітру залежить від координати $W_x = W_x(x)$, тоді слід врахувати чотири перші доданки. Тут третій доданок описує взаємодію хвиль з рухомих середовищем і визначає сили інерції

$$F_i = -\rho v_x \frac{\partial W_x}{\partial x}.$$

Четвертий доданок описує зміну фонових параметрів середовища.

Розглянемо поширення АГХ у стаціонарній вітровій течії, яка рухається з неоднорідною у просторі швидкістю. Згідно з супутниковими спостереженнями азимуту поширення АГХ переважно орієнтуються вздовж напрямків вітрів [2]. Нехай вітер направлено вздовж гори-

зонтальної осі x , тобто $\mathbf{W}(W_x, 0, 0)$, при цьому $\partial W_x / \partial x \neq 0$, $\partial W_x / \partial y = 0$, $\partial W_x / \partial z = 0$. Припущення $\partial W_x / \partial z = 0$ для висот термосфери є фізично обґрунтованим, оскільки, на відміну від нижньої атмосфери, вище рівня 200 км швидкість вітру змінюється з висотою дуже повільно через вплив молекулярної в'язкості [13].

Використаємо систему гідродинамічних рівнянь для стратифікованої у полі сили тяжіння атмосфери, записану для компонентів вертикальних зміщень елементарного об'єму газу [12]:

$$\begin{aligned} \rho \ddot{\xi} - \frac{\partial}{\partial x}(\lambda e) + g \frac{\partial}{\partial x}(\rho \zeta) &= 0, \\ \rho \ddot{\eta} - \frac{\partial}{\partial y}(\lambda e) + \rho g \frac{\partial \zeta}{\partial y} &= 0, \end{aligned} \quad (2)$$

$$\rho \ddot{\zeta} - \frac{\partial}{\partial z}(\lambda e) - \rho g \left(\frac{\partial \xi}{\partial x} + \frac{\partial \eta}{\partial y} \right) = 0,$$

де ξ, η і ζ — зміщення елементарного об'єму вздовж осей координат x, y і z відповідно, g — прискорення вільного падіння, $\lambda = \rho c_s^2$,

$$e = \frac{\partial \xi}{\partial x} + \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{\partial \zeta}{\partial z}.$$

На відміну від [12], у першому рівнянні (2) ми залишили залежність $\rho(x)$ під знаком похідної.

Будемо розглядати систему рівнянь (2) в системі відліку рухомого середовища. Оскільки ця система є неінерційною, окрім звичайних сил, які діють на елемент об'єму в нерухомому середовищі, на нього додатково будуть діяти сили інерції [10]. Згідно з виразом (1) у нашому випадку сила інерції має вигляд

$$F_i = -\rho v_x \frac{\partial W_x}{\partial x}.$$

Для монохроматичної плоскої хвилі $v_x = i\omega \xi$, тому в термінах горизонтального зміщення сила інерції

$$F_i = -i\rho\omega\xi \frac{\partial W_x}{\partial x},$$

де ω — частота в рухомій системі відліку. Цей вираз для сили інерції додамо у праву частину першого рівняння (2). Також у першому рівнянні (2) врахуємо зміну фонові густини атмосфери в неоднорідній течії. З рівняння неперервності слідує

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x} = -\frac{1}{W_x} \frac{\partial W_x}{\partial x}.$$

ДИСПЕРСІЙНЕ РІВНЯННЯ АКУСТИКО-ГРАВІТАЦІЙНИХ ХВИЛЬ У РУХОМОМУ СЕРЕДОВИЩІ

Розв'язок системи рівнянь (2) шукатимемо у вигляді

$$\begin{aligned} \xi, \eta, \zeta &\propto A(x) \exp(z/2H) \times \\ &\times \exp[i(\omega t - k_x x - k_y y - k_z z)], \end{aligned}$$

де $A(x)$ — амплітуда хвилі, яка залежить від горизонтальної координати; k_x, k_y — горизонтальні, k_z — вертикальна складова хвильового вектора; ω — частота хвилі в рухомій системі відліку. Залежність амплітуди від вертикальної координати приймемо пропорційною $\exp(z/2H)$ [7]. Тут H — висота однорідної атмосфери, яка є сталою величиною для ізотермічної атмосфери. Відмітимо, що такий вигляд залежності амплітуди від вертикальної координати забезпечує збереження щільності хвильової енергії з висотою [7]. Просторову неоднорідність течії враховано в амплітуді хвилі $A(x)$.

В рамках вищевказаних припущень з урахуванням сил інерції запишемо визначник системи (2), який повинен дорівнювати нулю:

$$\begin{vmatrix} -\omega^2 - c_s^2[q' + \tilde{k}_x^2] + c_s^2 \tilde{k}_x r + i\omega W r & ik_y c_s^2 (\tilde{k}_x - r) & \left[\frac{1}{2} g(2 - \gamma) + ik_z c_s^2 \right] (\tilde{k}_x - r) \\ ik_y c_s^2 \tilde{k}_x & c_s^2 k_y^2 - \omega^2 & -ik_y \left[\frac{1}{2} g(2 - \gamma) + ik_z c_s^2 \right] \\ -\tilde{k}_x \left[\frac{1}{2} g(2 - \gamma) - ik_z c_s^2 \right] & ik_y \left[\frac{1}{2} g(2 - \gamma) - ik_z c_s^2 \right] & \omega_a^2 - \omega^2 + c_s^2 k_z^2 \end{vmatrix} = 0, \quad (3)$$

де

$$\tilde{k}_x = q - ik_x, \quad q = \frac{1}{A} \frac{dA}{dx}, \quad q' = \frac{dq}{dx}, \quad r = \frac{1}{W_x} \frac{dW_x}{dx},$$

$c_s^2 = \gamma g H$ — квадрат швидкості звуку;

$\omega_a^2 = c_s^2 / 4H^2$ — квадрат частоти акустичної відсічки.

Згрупуємо доданки при дійсній частині визначника (3). Врахуємо також, що

$$\omega_a^2 - \omega_b^2 = g^2 (2 - \gamma)^2 / 4c_s^2,$$

де $\omega_b^2 = g(\gamma - 1) / (\gamma H)$ — квадрат частоти Брента — Вайсяля. В результаті отримаємо дисперсійне співвідношення АГХ в неоднорідному рухомому середовищі:

$$\begin{aligned} & [c_s^2(k_x^2 + \alpha) - \omega^2] \times \\ & \times [k_y^2 c_s^2 (\omega_b^2 - \omega^2) - \omega^2 (\omega_a^2 - \omega^2 + c_s^2 k_z^2)] - \\ & - c_s^2 (k_x^2 + \beta) [k_y^2 c_s^2 (\omega_b^2 - \omega^2) - \\ & - \omega^2 (\omega_a^2 - \omega_b^2 + c_s^2 k_z^2)] = 0, \end{aligned} \quad (4)$$

де $\alpha = qr - q' - q^2$, $\beta = qr - q^2$ — параметри, які характеризують неоднорідність.

Неважко показати, що коли швидкість вітру та амплітуда хвилі змінюються мало на масштабі довжини хвилі $\lambda_x = 2\pi / k_x$:

$$\lambda_x \frac{dA}{dx} \ll A, \quad \lambda_x \frac{dW_x}{dx} \ll W_x, \quad (5)$$

тоді параметри α і β також будуть малими у порівнянні з k_x^2 . Так з (5) одразу слідує

$$k_x^2 \gg (2\pi)^2 q^2, \quad k_x^2 \gg (2\pi)^2 qr.$$

Оцінимо також величину

$$q' = -q^2 + \frac{1}{A} \frac{d^2 A}{dx^2}.$$

Згідно (5)

$$\lambda_x^2 \frac{d^2 A}{dx^2} \ll \lambda_x \frac{dA}{dx} \ll A,$$

тобто

$$k_x^2 \gg (2\pi)^2 \frac{1}{A} \frac{d^2 A}{dx^2}.$$

Тому за умови (5) виконується $k_x^2 \gg q', q^2, qr$, і тоді параметри α і β є малими величинами. Якщо знехтувати α і β , вираз (6) збігається з відомим дисперсійним рівнянням АГХ для не-

рухомого середовища [7]:

$$c_s^2 (k_x^2 + k_y^2) (\omega_b^2 - \omega^2) - \omega^2 (\omega_a^2 - \omega^2 + c_s^2 k_z^2) = 0, \quad (6)$$

однак тут ω є частотою в системі відліку рухомого середовища. Оскільки $k_x^2 = (2\pi)^2 / \lambda_x^2$, тому за рахунок множника $(2\pi)^2$ дисперсійне рівняння (6) наближено виконується навіть у випадку, коли зміни dA/A и dW_x/W_x є не дуже малими. Достатньо, щоб вони були меншими від одиниці на масштабі λ_x . Тобто, при повільних змінах швидкості течії, її впливом на дисперсійне рівняння АГХ можна знехтувати. Цей результат узгоджується з висновками роботи [10].

ЗМІНА АМПЛІТУДИ АКУСТИКО-ГРАВІТАЦІЙНИХ ХВИЛЬ В НЕОДНОРІДНІЙ ТЕЧІЇ

Прирівнявши до нуля уявну частину визначника (3), отримаємо вираз для зв'язку амплітуди АГХ зі швидкістю вітру:

$$q = \frac{1}{2} r + \frac{1}{2k_x \omega} \left[k_y^2 - \frac{\omega^2 (\omega_a^2 - \omega^2 + c_s^2 k_z^2)}{c_s^2 (\omega_b^2 - \omega^2)} \right] \frac{dW_x}{dx}. \quad (7)$$

З урахуванням дисперсійного рівняння (6) можна переписати (7) у компактному вигляді:

$$\frac{1}{A} \frac{dA}{dx} = \frac{1}{2W_x} \frac{dW_x}{dx} - \frac{1}{2U_x} \frac{dW_x}{dx}. \quad (8)$$

Тут $U_x = \omega / k_x$ — фазова горизонтальна швидкість хвилі у системі відліку рухомого середовища. Перший доданок у виразах (7) і (8) пов'язаний зі зміною фонові густини середовища внаслідок зміни швидкості течії. Другий доданок зумовлений силами інерції і залежить від спектральних властивостей хвилі.

Для отримання залежності амплітуди АГХ від швидкості вітру перейдемо у систему відліку нерухомого спостерігача. Частоти в нерухомій і рухомій системах відліку пов'язані співвідношенням Доплера $\omega = \omega_0 - k_x W_x$. Тоді $U_x = U_{x0} - W_x$, де $U_{x0} = \omega_0 / k_x$. Згідно з [6] величина U_{x0} повільно змінюється в залежності від W_x . Тому для спрощення припустимо $U_{x0} = \text{const}$, тоді після інтегрування (8) отримаємо простий вираз для відносних змін амплітуди АГХ в неоднорідному вітрі:

$$\frac{A}{A_0} \approx \left[\frac{W_x (U_{x0} \pm W_x)}{W_{x0} (U_{x0} \pm W_{x0})} \right]^{1/2}, \quad (9)$$

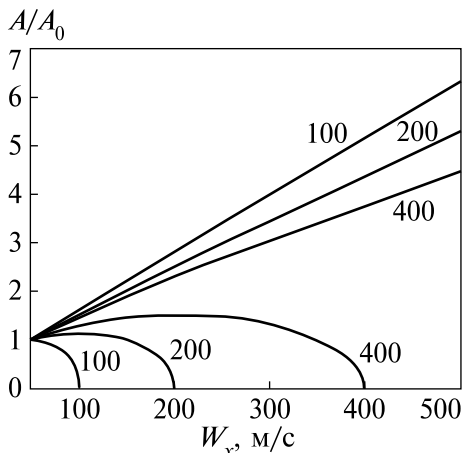


Рис. 2. Залежність амплітуди АГХ від швидкості вітру при $U_{x0} = 100, 200$ та 400 м/с. Нижні криві відповідають попутному з хвилею вітру, а верхні — зустрічному вітру

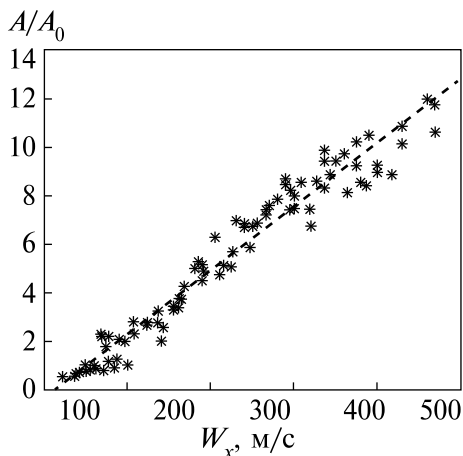


Рис. 3. Залежність відносних змін амплітуди АГХ від швидкості зустрічного вітру. Зірочки — експериментальні значення, штрихова пряма — лінійна інтерполяція даних, яка майже збігається з теоретичною залежністю (9) при $U_{x0} \rightarrow 0$

де знак « \rightarrow » відповідає попутному з хвилею вітру, а знак « $+$ » — зустрічному вітру.

Згідно з даними супутникових вимірювань на висотах термосфери завжди є деякий фоновий рівень хвильової активності. Амплітуди фонових флуктуацій густини $\Delta\rho/\rho \approx 0.5\%$ відповідають середній швидкості фонового вітру $W_x \approx 50$ м/с (див. рис. 1). Прийнемо ці величини як початкові значення амплітуди АГХ A_0 та

швидкості вітру W_{0x} . З урахуванням початкових умов дослідимо, як змінюється амплітуда АГХ у горизонтально неоднорідному вітрі. На рис. 2 показано відносну зміну амплітуди АГХ A/A_0 у попутному та зустрічному вітрі при різних значеннях U_{x0} . Верхні криві відповідають зустрічному вітру, а нижні — попутному вітру. Видно, що у попутному вітрі амплітуда хвиль швидко зменшується з наближенням фазової швидкості АГХ U_{x0} до швидкості вітру. Коли ці швидкості зрівнюються ($U_{x0} = W_x$), відбувається поглинання хвилі течією. На графіках ця ситуація відповідає зменшенню амплітуди хвиль до нуля. У зустрічному вітрі амплітуди АГХ майже лінійно збільшуються за рахунок течії, при цьому збільшення амплітуд хвиль є тим більшим, що меншим стає значення U_{x0} .

ПОРІВНЯННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ З СУПУТНИКОВИМИ ДАНИМИ

Порівнюємо отримані теоретичні результати з експериментальними даними. Для цього розглянемо експериментальну залежність A/A_0 від швидкості вітру W_x . На рис. 3 зірочками позначено виміряні на супутнику значення амплітуд АГХ при різній швидкості вітру W_x . Нормування здійснюється на амплітуду фонового рівня АГХ у відносних флуктуаціях густини атмосфери $A_0 \approx 0.5\%$, якому відповідає швидкість вітру $W_{0x} \approx 50$ м/с. Теоретичні залежності (9) для зустрічного вітру мають вигляд прямих, нахил яких залежить від величини U_{x0} (див. рис. 2). Тому змінюючи величину U_{x0} , можна досягти максимального збігу теоретичної прямої з прямою лінійної апроксимації експериментальних даних. Теоретична залежність поступово наближається до експериментальної по мірі зменшення величини U_{x0} . Виявилось, що вказані залежності фактично збігаються при $U_{x0} \rightarrow 0$. Горизонтальні групові швидкості АГХ є меншими від фазових горизонтальних швидкостей $U_{gr0} < U_{x0}$ [7]. Тому спостережувані АГХ повинні також мати групову швидкість $U_{gr0} \rightarrow 0$ для нерухомого спостерігача, тобто фактично ці хвилі «зупиняються» у зустрічному вітрі. При поширенні хвилі в зустрічному вітрі її групова швидкість для нерухомого спостерігача стано-

вить $U_{gr0} = U_{grx} - W_x$. Коли групова швидкість у системі відліку рухомого середовища зрівнюється за величиною зі швидкістю вітру, тоді $U_{gr0} = 0$. Цей ефект називається блокуванням хвиль на зустрічній течії. При наближенні до точки блокування амплітуда АГХ швидко збільшується [6]. Саме такі хвилі великих амплітуд є найбільш помітними в супутникових вимірюваннях над полярними шапками в обох півкулях Землі [1]. При цьому частоти АГХ, які визначені за супутниковими даними відносно системи відліку рухомого середовища, є близькими до частоти БВ [6]. Наземний спостерігач буде бачити ці збурення поблизу точки блокування як дуже низькочастотні АГХ великих амплітуд.

Гіпотетичні джерела полярних АГХ переважно локалізовані в інтервалі висот атмосфери 100...200 км, а спостереження на супутнику DE2 провадили вище 250 км. Тому прилади на супутнику реєструють насамперед не первинні АГХ, які безпосередньо згенеровані джерелом. У прямих вимірюваннях з супутника, ймовірно, досліджується хвильове поле, яке значною мірою є результатом взаємодії АГХ з вітровими течіями. Спостережувані з супутника АГХ над полярними шапками характеризуються такими властивостями: 1) поширення назустріч вітру; 2) залежність амплітуд від швидкості вітру; 3) частота у системі відліку середовища близька до частоти Брента — Вайсяля. Перелічені особливості полярних АГХ можна пояснити в рамках розглянутої у цій роботі моделі.

ВИСНОВКИ

Досліджено поширення АГХ у просторово неоднорідній горизонтальній вітровій течії. Отримано дисперсійне рівняння АГХ у системі відліку середовища, що рухається з неоднорідною швидкістю. При цьому враховано сили інерції та зміну фонові густини атмосфери в неоднорідній течії. Показано, що при повільній зміні швидкості вітру дійсна частина отриманого дис-

персійного рівняння збігається з дисперсійним рівнянням АГХ для нерухомого середовища. Тому слабка просторова неоднорідність мало впливає на дисперсійне співвідношення АГХ, а основний вплив неоднорідності течії полягає у зміні амплітуди хвиль.

Отримано вираз для зміни амплітуди АГХ у залежності від швидкості неоднорідної течії. Для зустрічного вітру ця залежність є приблизно лінійною, при цьому кут нахилу прямої визначається значенням горизонтальної фазової швидкості хвилі U_{x0} . У попутному вітрі амплітуда АГХ швидко зменшується, особливо з наближенням U_{x0} до величини швидкості вітру.

Здійснено порівняння теоретичних результатів з експериментальною залежністю амплітуди АГХ від швидкості зустрічного вітру. Для цього використано дані супутникових спостережень хвиль у полярній термосфері. На основі аналізу зроблено висновок, що горизонтальні фазова та групова швидкості АГХ у полярних областях термосфери є близькими до нуля для нерухомого спостерігача. Це свідчить про переважання у спостереженнях заблокованих на зустрічній течії хвиль.

Таким чином, спостережувані властивості АГХ над полярними областями можна пояснити вітровою фільтрацією первинних хвиль, що генеруються різними джерелами. Первинні хвилі, ймовірно, генеруються з різними спектральними властивостями і поширюються в різні боки від джерела. Однак попутні з вітром АГХ швидко загасають, а хвилі, що рухаються назустріч вітру, навпаки, підсилюються. Найбільше збільшуються амплітуди АГХ у зустрічній течії при наближенні до точки блокування. Тому саме такі АГХ і переважають у спостереженнях з борту супутника.

Роботу виконано при підтримці Цільової комплексної програми НАН України з наукових космічних досліджень на 2018—2022 роки.

ЛІТЕРАТУРА

1. Федоренко А. К., Крючков Е. И. Распределение среднемасштабных АГВ в полярных регионах по данным спутниковых измерений. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2011. **51**, № 1. С. 527—539.
2. Федоренко А. К., Крючков Е. И. Ветровой контроль распространения акустико-гравитационных волн в полярной термосфере. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2013. **53**, № 3. С. 394—405.
3. Bretherton F. P., Garrett C. J. R. Wavetrains in inhomogeneous moving media. *Proc. Roy. Soc.* 1969. **A.302**, P. 529—554.
4. Cowling D. H., Webb H. D., Yeh K. C. Group rays of internal gravity waves in a wind-stratified atmosphere. *J. Geophys. Res.* 1971. **76**. P. 213—220.
5. Fedorenko A. K., Bespalova A. V., Cheremnykh O. K., Kryuchkov E. I. A dominant acoustic-gravity mode in the polar thermosphere. *Ann. Geophys.* 2015. **33**. P. 101—108. doi:10.5194/angeo-33-101-2015.
6. Fedorenko A. K., Kryuchkov E. I., Cheremnykh O. K., Klymenko Yu. O., Yampolski Yu. M. Peculiarities of acoustic-gravity waves in inhomogeneous flows of the polar thermosphere. *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Phys.* 2018. **178**. P. 17—23. doi.org/10.1016/j.jastp.2018.05.009.
7. Hines C. O. Internal gravity waves at ionospheric heights. *Can. J. Phys.* 1960. **38**. P. 1441—1481.
8. Innis J. L., Conde M. Characterization of acoustic-gravity waves in the upper thermosphere using Dynamics Explorer 2 Wind and Temperature Spectrometer (WATS) and Neutral Atmosphere Composition Spectrometer (NACS) data. *J. Geophys. Res.* 2002. **107**, № A12. doi: 10.1029/2002JA009370.
9. Killeen T. L., Won Y. I., Nicieyewski R. J., Burns A. G. Upper thermosphere winds and temperatures in the geomagnetic polar cap: Solar cycle, geomagnetic activity, and interplanetary magnetic fields dependencies. *J. Geophys. Res.* 1995. **100**. P. 21327—21342.
10. Lighthill J. *Waves in Fluids*. Cambridge University Press, 1978. 504 p.
11. Lühr H., Rentz S., Ritter P., Liu H., Häusler K. Average thermospheric wind pattern over the polar regions, as observed by CHAMP. *Ann. Geophys.* 2007. **25**. P. 1093—1101. (www.ann-geophys.net/25/1093/2007).
12. Tolstoy I. The theory of waves in stratified fluids including the effects of gravity and rotation. *Rev. Modern Phys.* 1963. **35**, № 1. P. 207—230.
13. Vadas S. L., Fritts M. J. Thermospheric responses to gravity waves: Influences of increasing viscosity and thermal diffusivity. *J. Geophys. Res.* 2005. **110**. D15103. doi:10.1029/2004JD005574.
14. Williams P. J. S., Lewis R. V., Virdi T. S., Lester M., Nielsen E. Plasma flow bursts in the auroral electrojets. *Ann. Geophysicae*. 1992. **10**. P. 835—848.

REFERENCES

1. Fedorenko A. K., Kryuchkov E. I. (2011). Distribution of Medium Scale Acoustic Gravity Waves in polar Regions according to Satellite Measurement Data. *Geomagn. Aeron.*, **51**, № 1, 527—539.
2. Fedorenko A. K., Kryuchkov E. I. (2013). Wind Control of the Propagation of Acoustic Gravity Waves in the Polar Atmosphere. *Geomagn. Aeron.*, **53**, № 3, 394—405.
3. Bretherton F. P., Garrett C. J. R. (1969). Wavetrains in inhomogeneous moving media. *Proc. Roy. Soc.*, **A.302**, 529—554.
4. Cowling D. H., Webb H. D., Yeh K. C. (1971). Group rays of internal gravity waves in a wind-stratified atmosphere. *J. Geophys. Res.*, **76**, 213—220.
5. Fedorenko A. K., Bespalova A. V., Cheremnykh O. K., Kryuchkov E. I. (2015). A dominant acoustic-gravity mode in the polar thermosphere. *Ann. Geophys.*, **33**, 101—108. doi:10.5194/angeo-33-101-2015.
6. Fedorenko A. K., Kryuchkov E. I., Cheremnykh O. K., Klymenko Yu. O., Yampolski Yu. M. (2018). Peculiarities of acoustic-gravity waves in inhomogeneous flows of the polar thermosphere. *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Phys.*, **178**, 17—23. doi.org/10.1016/j.jastp.2018.05.009.
7. Hines C. O. (1960). Internal gravity waves at ionospheric heights. *Can. J. Phys.*, **38**, 1441—1481.
8. Innis J. L., Conde M. (2002). Characterization of acoustic-gravity waves in the upper thermosphere using «Dynamics Explorer 2» Wind and Temperature Spectrometer (WATS) and Neutral Atmosphere Composition Spectrometer (NACS) data. *J. Geophys. Res.*, **107**, № A12. doi: 10.1029/2002JA009370.
9. Killeen T. L., Won Y. I., Nicieyewski R. J., Burns A. G. (1995). Upper thermosphere winds and temperatures in the geomagnetic polar cap: Solar cycle, geomagnetic activity, and interplanetary magnetic fields dependencies. *J. Geophys. Res.*, **100**, 21327—21342.
10. Lighthill J. (1978). *Waves in Fluids*. Cambridge University Press, 504 p.
11. Lühr H., Rentz S., Ritter P., Liu H., Häusler K. (2007). Average thermospheric wind pattern over the polar regions, as observed by CHAMP. *Ann. Geophys.*, **25**, 1093—1101 (www.ann-geophys.net/25/1093/2007).

12. Tolstoy I. (1963). The theory of waves in stratified fluids including the effects on gravity and rotation. *Rev. Modern Phys.*, **35**, № 1, 207 — 230.
13. Vadas S. L., Fritts M. J. (2005). Thermospheric responses to gravity waves: Influences of increasing viscosity and thermal diffusivity. *J. Geophys. Res.*, **110**, D15103. doi:10.1029/2004JD005574.
14. Williams P. J. S., Lewis R. V., Virdi T. S., Lester M., Nielsen E. (1992). Plasma flow bursts in the auroral electrojets. *Ann. Geophysicae*, **10**, 835—848.

Стаття надійшла до редакції 12.10.2022

Після доопрацювання 05.11.2022

Прийнято до друку 17.11.2022

Received 12.10.2022

Revised 05.11.2022

Accepted 17.11.2022

A. K. Fedorenko, Senior Researcher, Ph.D. in Phys.&Math.

ORCID: 0000-0002-2327-9556

E-mail: fedorenkoak@gmail.com

Ye. I. Kryuchkov, Senior Researcher, Ph.D. in Tech.

ORCID: 0000-0002-9131-3277

E-mail: kryuchkov.ye@gmail.com

O. K. Cheremnykh, Head of Department, Dr. Sci., Correspondent Member of the NAS of Ukraine

ORCID: 0000-0001-6789-3382

E-mail: oleg.cheremnykh@gmail.com

I. T. Zhuk, Senior Researcher, Ph.D. in Phys.&Math.

E-mail: zhukigor@gmail.com

Space Research Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine and State Space Agency of Ukraine

40 Glushkov Ave., build. 4/1, Kyiv, 03187 Ukraine

WAVE DISTURBANCES OF THE ATMOSPHERE IN A SPATIALLY INHOMOGENEOUS FLOW

Analysis of measurements by the Dynamics Explorer 2 satellite indicates a close connection between atmospheric wave disturbances and wind circulation in the polar thermosphere. According to satellite observations, large-amplitude acoustic-gravity waves are systematically observed in the regions of formation of powerful wind systems. At the same time, the azimuths of AGW propagation are spatially consistent with the directions of wind circulation. Waves propagate mainly against the wind, and their amplitude is approximately proportional to the wind speed. In order to explain the experimental data, the paper theoretically investigated the changes in the amplitudes of AGW in a horizontally inhomogeneous wind flow. The dispersion equation of the AGW in the reference frame of the medium, which moves with a non-uniform speed, was obtained. When obtaining it, inertial forces were taken into account, as well as the change in the background density of the atmosphere in an inhomogeneous flow. It is shown that under the slow change in wind speed, the real part of this equation coincides with the dispersion equation of AGW for a stationary medium. An expression for the change in the amplitude of waves in a moving medium was obtained, according to which, in an oncoming inhomogeneous wind, the amplitude of the wave increases approximately according to a linear law, which is consistent with the data of satellite observations.

Keywords: acoustic-gravity wave, polar thermosphere, spatially inhomogeneous flow.

<https://doi.org/10.15407/knit2022.06.034>
UDC 579.65

I. ORLOVSKA¹, Junior Scientific Researcher

ORCID.org/0000-0002-3016-049X

E-mail: i.vviki@ukr.net

O. PODOLICH¹, Ph. D., Scientific Researcher

ORCID.org/0000-0002-3778-0915

E-mail: podololga@ukr.net

O. KUKHARENKO¹, Ph.D., Scientific Researcher

ORCID.org/0000-0002-0944-5415

E-mail: hikia48@gmail.com

G. ZUBOVA¹, Junior Scientific Researcher,

ORCID.org/0000-0002-0514-2695

E-mail: anka.kiev@gmail.com

O. REVA², Ph.D., Professor (Bioinformatics)

ORCID.org/0000-0002-5459-2772

E-mail: oleg.reva@up.ac.za,

A. DI CESARE³, Scientific Researcher

ORCID.org/0000-0002-5481-6182

E-mail: andrea.dicesare@cnr.it

A. GÓES-NETO⁴, Ph.D., Professor

ORCID.org/0000-0002-7692-6243

E-mail: arigoesneto@icb.ufmg.br

V. AZEVEDO⁵, Ph.D, Full Professor, Titular Member of the Brazilian Academy of Sciences

ORCID.org/0000-0002-4775-2280

E-mail: vascoariston@gmail.com

D. BARH^{5,6}, Ph.D., Visiting Full Professor (Bioinformatics),

ORCID.org/0000-0002-2557-7768

E-mail: dr.barh@gmail.com;

J.-P. DE VERA⁷, Ph.D., Head of Department

ORCID.org/0000-0002-9530-5821

E-mail: jean-pierre.devera@dlr.de

N. KOZYROVSKA¹, Ph.D., Head of Laboratory

ORCID.org/0000-0002-2849-3471

E-mail: kozyrna@ukr.net

¹ Institute of Molecular Biology and Genetics of the National Academy of Sciences of Ukraine

150 Zabolotnoho Str., Kyiv, 03143 Ukraine

² Centre for Bioinformatics and Computational Biology, Dep. Biochemistry, Genetics and Microbiology;

University of Pretoria

Lynnwood Rd, Hatfield, Pretoria, 0002 South Africa

Цитування: Orlovska I., Podolich O., Kukharenko O., Zubova G., Reva O, di Cesare A., Góes-Neto A., Azevedo V., Barh D., de Vera J.-P., Kozyrovska N. The conceptual approach to the use of postbiotics based on bacterial membrane nanovesicles for prophylaxis of astronauts' health disorders. *Space Science and Technology*. 2022. **28**, № 6 (139). P. 34–51. <https://doi.org/10.15407/knit2022.06.034>

³ National Research Council of Italy-Water Research Institute (CNR-IRSA)
Corso Tonolli, 50, 28922 Pellanza, Verbania, Italy

⁴ Universidade Estadual de Santa Cruz, Campus Soane Nazaré de Andrade
Rodovia Jorge Amado, km 16, Bairro Salobrinho Ilhéus, Brazil

⁵ Institute of Biological Sciences, Federal University of Minas Gerais, Depto de Genética, Ecologia e Evolução, ICB/UFMG
Av. Antonio Carlos, 6627. Pampulha, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brazil

⁶ Centre for Genomics and Applied Gene Technology, Institute of Integrative Omics and Applied Biotechnology
Nonakuri, Purba Medinipur, WB-721172, India

⁷ Microgravity User Support Center, German Aerospace Center (DLR)
Linder Höhe, 51147 Cologne, Germany

THE CONCEPTUAL APPROACH TO THE USE OF POSTBIOTICS BASED ON BACTERIAL MEMBRANE NANOVESICLES FOR PROPHYLAXIS OF ASTRONAUTS' HEALTH DISORDERS

*The functional fermented foods containing live microorganisms and their components are necessary for the normal functioning of the human body as normal gut microbiota needs fuel from external microbial organisms and their nanostructures — membrane vesicles (MVs), excreting outside. The concept that MVs may contribute to astronauts' health probably to the same extent as their parental microbial cells do and be a temporary substitute for living microbial cells until we know more about the behavior of microbes in the space environment. The advantage of MVs is that they are not alive and cannot be changed under unfavorable conditions as microbial organisms may be. As the model, we selected MVs of a robust to environmental factors kombucha multimicrobial culture (KMC), known for its health-promoting characteristics for humans. We exposed KMC on the International Space Station in a hybrid space/Mars-like environment for an initial proof-of-concept stage. In the exposure study, KMC has survived a long-term period in harsh conditions, and the MVs generated by post-flight kombucha community members did not acquire toxicity, despite the changed membrane composition in the environment imitated conditions on the Mars surface. This observation, together with our KMC metagenomic and comparative genomic analyses of the dominant KMC bacterium *Komagataeibacter oboediens*, showed that the ground reference sample and space-exposed ones were similar in topology and maintained their stability. In the next stage, we assessed the fitness, safety, and biodistribution of MVs of post-flight *K. oboediens* and showed that they were altered, but the modifications in membrane structure did not result in toxicity acquisition. Our proof-of-concept strategy is discussed in this review in line with the literature.*

Keywords: *postbiotics, extracellular membrane vesicles, kombucha multimicrobial culture, fermented food, health promotion.*

1. INTRODUCTION

In a strategy of the solar system exploration, outlined in the third edition of the Global Exploration Roadmap, it is imperative to find solutions for astronaut health protection, especially in long-distance missions, *e.g.*, to Mars. Space environment factors, such as microgravity and radiation, induce changes in a gut microbiome composition with adverse outcomes for the crew's health [56, 68]. The most adverse effects include neurological [36], immune disorders, and gastrointestinal complications [80]. Correction of astronauts' gut microbiome with microbial therapeutics and prebiotics may be recommended within the spaceflight [5, 17, 51, 52]. The current proposal for correcting the intestinal microbiota of crews includes using simple artificial compositions of defined bacteria and yeast and producing yogurt or kefir, which have not yet been tested on low Earth

orbit (LEO) [5]. Other fermented products containing food-grade microbial organisms, *e.g.*, kombucha multimicrobial community (KMC) (composed of beneficial for human mutualistic bacteria and yeasts, which together organize a robust micro-ecosystem, producing health effects [1, 89], could be considered [50, 52].

On the eve of long-duration flights, space administrations have no safety protocols and guidelines for probiotics production on board and use for crew's health disorders prophylaxis. Nevertheless, therapeutic microbes, such as lactic acid and other bacteria or yeasts, need special consideration regarding their safety, efficiency, genetic and community stability, and economic reasonability. While some fundamental and regulatory barriers to using live microbial therapeutics remain, there is a workable solution. Postbiotics as non-alive biologics, which are overall

secreted by food-grade microorganisms, are considered safer than living microbial organisms and could be the interim stage of microbial usage in the prophylaxis of health disorders of crewmembers during spaceflights. A novel class of postbiotics represents extracellular bacterial membrane vesicles (BMV) [50, 53, 70]. Our idea is to temporarily use postbiotic BMVs as an alternative to probiotics based on evidence that BMVs interact with the same pathways in hosts as parental bacteria, influencing host physiology. Researches to date indicate that postbiotics/BMV can have direct immunomodulatory effects, and evidence can be found for the use of postbiotics to improve overall health [26, 94]. They may reach the brain and interact directly with the central nervous system (CNS) [43]. Thus, BMVs can be essential in modulating human behavior and controlling mood disorders, including anxiety and depression [27, 68].

2. THE GUT MICROBIOME AS A MICRO-ECOSYSTEM IN DICTATING HUMAN HEALTH

Any microbiome is a characteristic microbial community (a microbiota, a collection of microorganisms) occupying a well-defined habitat with distinct physical and chemical properties and specific activity in this habitat [7]. The entities usually not considered living microorganisms — phages, viruses, plasmids, prions, viroids — do not belong to the microbiota. The intestinal microbiota of mammals mainly consists of bacteria, archaea, fungi, and protists [45] and complement the host genome with millions of genes, contributing to functions absent in hosts, e.g., decomposing cellulose [28, 37, 72]. Bacteria represent the biggest proportion of microbiota (99 %). The gut microbiota is considered a «hidden organ», and mammal organisms populated with microbiota can be accepted as «superorganisms» (summarized in [85]). In addition to its role in nutrition, metabolism, and energy production, the gut microbiota regulates immune homeostasis and responses against pathogens and physical and chemical stressors. It has been observed that alteration in human gut microbiota has resulted in various chronic and acute metabolic diseases (obesity, neurogenic diseases, diabetes, and others) [42]. As a micro-ecosystem (a subset of the biotic community and environmental factors), it

is balanced by commensals, symbionts, and pathobionts that collectively benefit the host, so the disrupted balance in a steady-state microbiome leads to disease. The microbiome is an open system subjected to acquiring novel information from foreign ecosystems through external signals and invasion by outsider microbes [34]. Specific environmental factors induce changes in microbiome composition, which may alter host-microbe interactions and affect immune function, leading to health problems.

Changes in gut microbiota composition under spaceflight. During spaceflight, astronauts are exposed to multiple unique environmental factors, particularly microgravity and radiation, that also can induce changes in microbiome composition (*i.e.*, dysbiosis) (summarized in [85]) and cause a range of harmful health consequences. Exposure to external stressors, extreme hygiene, and psycho-emotional disorders in an aggressive environment can lead to dysbiosis and immune imbalance in astronauts. In addition, a diet that is insufficiently enriched with soluble fiber and avoids traditional probiotics may not be as effective as to keep the body and brain healthy. In previous times [57] and the last years [36, 62, 90], researchers on astronauts' gut microbiota mainly focused on microgravity's influence. It was discovered that alterations in the composition and functionality of the gut microbiome could be induced even by short-term space travel. Liu et al. [60] reported shifts between dominant genera in the microbiome during space missions of up to 35 days that led to an increased abundance of *Bacteroides* and a decrease of the probiotic taxa *Lactobacillus* and *Bifidobacterium* (the bacteria connected to immunomodulation). Under long-term space travel, the crew gut microbiome composition changed with a specific increase in the *Firmicutes*-to-*Bacteroidetes* ratio. It became more similar between astronauts and comparable to the microbiome composition of skin, nose, and tongue [90]. Moreover, the authors have reported the increase of genera associated with chronic intestinal inflammation and a reduction in the relative abundance of the genera with anti-inflammatory properties.

It may be suggested that supplementing live microbial foods may decrease space-related factors' impact on the gut microbiota. It may be a result of the flight's imposed conditions, including the decrease

in dietary fiber in the astronaut diet. Additionally, astronauts experienced spaceflight-related reductions in short-chain fatty acid (SCFA) — acetate, butyrate, and propionate, which fuel helpful intestinal bacteria in their gut microbiomes, such as *Pseudobutyrvibrio* and *Akkermansia* [90].

Correction of dysbiosis and the usefulness of microbial therapeutics. As the human gut microbiota is sensitive to orbital spaceflight, physiological adaptation to the new environment in future exploration missions will be more complicated than that in the ISS and lead to more changes in different body systems, including the gut microbiome. Recommendations have been formulated on correcting gut microbiota to keep the crew healthy and brains sharp [54, 85, 88]. We emphasize measures that include microbial therapeutics and postbiotics.

Probiotics, fecal microbiota, and defined consortia perspectives on therapeutic microbes. Correction of astronauts' gut microbiome with microbial alive therapeutics could be appropriate in analogy to ground practice. However, considered a peculiarity of spaceflight missions, therapeutic microbes have limitations for use in spaceflight practice because of insufficient knowledge about their nature and safety or the reinsurance of officials responsible for flight safety. Among therapeutic microbial organisms, *probiotics* are considered «a live microorganism(s) which when administered in adequate amounts confer a health benefit on the host» (according to the Food and Agriculture Organization of the United Nations (Food and Agriculture Organization, 2006. Probiotics in food: health and nutritional properties and guidelines for evaluation. Food and Agriculture Organization, Rome, Italy). The most studied probiotics are the lactic acid bacteria, particularly *Lactobacillus* and *Bifidobacterium*, which are normal inhabitants of the human and animal intestine, and their presence is essential for maintaining the intestinal microbial ecosystem. Probiotics are necessary to maintain optimal immunity [63, 97]. Direct effects of probiotics on other microbes convey two primary mechanisms of action: inducing their antimicrobial effects by producing bacteriocins (peptides naturally synthesized by ribosomes) and secreting bile acids; both destroy pathogenic bacterial membranes — probiotics aid in decreasing the spread of antibiotic-resistant bacteria

[29]. Maintaining a balanced microbiota by administering probiotics and probiotic-based foods and beverages will reduce antibiotic-resistant bacterial infections [86, 95]. *Lactobacillus* strains have been shown to produce neuroactive and neuroendocrine molecules to reduce stress-induced corticosterone and anxiety- and depression-related behavior [8]. In pain management, probiotics also have shown promising results [67].

It should be noted that probiotics are effective if there are indigestible foods in the diet. That is why *prebiotics* (food components that selectively stimulate the growth and/or activity of beneficial microorganisms directly in the human intestine) are recommended in the diet, and together with probiotics, these supplements form *synbiotics*. Synbiotics are often defined as 'synergistic mixtures of probiotics and prebiotics that beneficially affect the host by improving the survival and colonization of live beneficial microorganisms in the host's gastrointestinal tract' (FAO/WHO). Certain dietary fibers may preserve the probiotic efficacy by serving as the scaffold, *e.g.*, for probiotic Bacilli [83]. Synbiotics can modulate gut microbiota composition and microbial metabolite production [98].

In addition to probiotics, fecal microbiota transplantation (FMT) is reasonable for reestablishing biodiversity in a dysbiotic gut microbiome [91]. The most common practice is to derive fecal samples from healthy donors and use them to inoculate the alimentary tracts of patients exhibiting dysbiosis. Several studies have shown that after antibiotic treatment, autologous (self) fecal microbiota transplantation could reconstitute the changed microbiome [82, 84]. While the FMT approach effectively demonstrates the therapeutic potential on Earth, this practice should be standardized for crews.

Another solution for correcting dysbiosis is a genome-guided designed microbial consortium (DMC), a rationally selected collection of known microbes for treating intestinal diseases. DMC anticipates the removal of potential pathogens or antibiotic-resistant organisms from the gut microbiome [9]. Selected microbes with specific genes present in DMC should have antagonistic activity toward target pathogens. Hence, DMC has a number of advantages over, *e.g.*, FMT because symbiotic interactions

between therapeutic microbes and host are challenging to characterize due to their complexity. Including other beneficial microbial organisms (*i.e.*, archaea, fungi) in DMC and understanding the mechanisms of action is the long way toward bringing DMC into actual astromedicine practice [2].

A new possibility for phage-based precise microbiome editing is on the horizon to modulate microbial activities important for public health [49]. Phage therapy is envisioned as the targeted elimination of pathogens and probably aids those who do not restrain but remove pathogens, although the process of pathogens' appearance is permanent, and only collective defense forces oppose this arms race [54]. However, this promising tool is still in its infancy and probably will be used in the distant future for crews.

To sum up, microbiome engineering is a rapidly evolving frontier for solutions to improve human health, and two general engineering strategies — to manipulate indigenous microbes or to introduce new members — will play a fundamental role in space exploration. Both strategies have been practiced crudely for thousands of years in human health. However, despite current technical advances, designed inoculants/transplants are not expected to establish or confer long-lasting (months to years) modifications to micro-ecosystem structure and functions in crews.

According to professionals and decision-makers, the use of alive microbes for prevention or correction of disorders in astronauts will require conducting research that meets all required norms known in national regulations for probiotic microbes design, including genetic level (genes for pathogenicity and toxicity, mobile genetic elements, viruses, and known molecular mechanisms that improve human health [18]). The next level is to screen the crew for immunological tolerance against the probiotics and to prove the predicted beneficial effects. Then, a viable probiotics library for the crew should be built, and a personalized in-flight probiotics administration protocol should be established [17, 54].

Kombucha as a synbiotic and edible vaccine. A beverage and jellyfish-like zoogley (a cellulose-based pellicle film) of Kombucha can be a good form of a synbiotic for extreme expeditions for several reasons. First of all, kombucha culture is a source of probiotic bacteria and yeast, as well as nanocellulose fibers —

a prebiotic [89]. Second, KMC provides SCFAs that increase immunity. In addition, KMC is a rich source of vitamins C and K2, a group of B vitamins, and other biologically active compounds and minerals necessary for digestion. Finally, *in situ* processed KMC zoogley, enriched with coarse microfiber, polysaccharides, and proteins will be a permanent source of food for the crew and animals [50]. The diversity and stability of natural mutualistic microorganisms and a wide range of activity is the advantage of KMC over probiotics, consisting of a single strain or an artificially composed mixture of beneficial strains of microorganisms. Numerous observations have shown that the kombucha culture regulates the activity of the gastrointestinal tract via normalizing microbiota, *e.g.*, suppressing putrefactive pathogenic microflora and improving the body's protective properties. These data of traditional medicine were confirmed by laboratory tests [16] and in the former U.S.S.R. clinical settings [6]. In particular, the consumption of kombucha culture by LPS-treated or the type-2-diabetes-mice promoted the diversity of their gut microbiota, activating the SCFA-producing bacteria and providing anti-inflammatory effects [92, 96]. The recovery of normal gut microbiota was also observed in mice with the nonalcoholic fatty liver disease treated with kombucha, *i.e.*, an increase in the proportion of *Bacteroidetes* and *Lactobacillus* and a decrease of pathogenic bacteria caused this disease [48].

A significant advantage of KMC over microorganisms of health-promoting/therapeutic and biotechnological value is waste-free production, ranging from small-scale KMC products manufactured within bioregenerative life support systems (a confined self-sustained artificial ecosystem for the growing plant and animal food and generation of O₂, water, other necessary consumables) to large-scale production of «by-product» — cellulose. The organization of the KMC as a micro-ecosystem provides another decisive advantage over most microorganisms: resistance to contamination, easy cultivation, and versatility. Our results show that although the diversity of the KMC members changes during the flight on the LEO, they maintain their function and tolerance to stressors [39, 70].

Thanks to the biofilm hub, kombucha culture is almost immortal and can be activated when needed;

this means that the KMC does not have an expiration date and is probably its main advantage. Slow-growing biofilms form many persisters (subpopulations of dormant cells) that tolerate adverse factors. Kombucha culture exhibits metabolic plasticity and can be adapted to various economically viable food sources. KMC can be easily, safely, inexpensively, and effortlessly reproduced *in situ* (during flights and outposts.). It is important to note that the final product of Kombucha, in addition to positive health effects, also creates positive emotions, and caring for Kombucha for making kraft foods is good for emotional balance.

Risk assessment of KMC members. The US Food and Drug Administration (FDA, 1995) has concluded that Kombucha is safe for human consumption if adequately prepared. However, in extraterrestrial conditions, there is a risk of mutations that adapt microorganisms to new conditions and may harm human health. An experiment was conducted on the International Space Station (ISS) to prove or disprove this, where kombucha microorganisms were affected by space/Mars-like factors. The presence of humans on Mars is expected by the end of this decade; therefore, in research, it is vital to add to the factors of real space on the LEO characteristic Martian factors (ultraviolet light, atmosphere, and pressure). Simulated on the ISS experiments reduce the cost of deep space experiments that do not require getting to Mars. In the experiment BIOMEX we investigated the influence of Mars-like factors simulated on the ISS on the survival of the KMC IMBG-1, genetic stability, and toxicity of returned KMC samples [20, 70]. Dehydrated living cellulosic KMC films populated by pro- and eukaryotic microbial organisms that were latent within the cellulosic hub were used in a space experiment. After the period of 1.5 year-exposure, the KMC members recovered the kombucha culture [70].

Study of the metagenome of the KMC and the genomes of *Komagataeibacter* spp. from the standpoint of biosafety. We used a metagenomic approach to determine the structure and functionality of the KMC community, previously influenced by UV⁺ and UV-Mars-like conditions modeled on the LEO. After the action of hybrid space/Martian factors, there was a shift in the KMC structure. Ultraviolet-irradiated samples were mainly changed, and the dominant ge-

nus *Komagataeibacter* showed an increased number of species after the resuscitation. Functional profiling showed that the genes involved in the UvrABC system were most enriched in the metagenomes of KMC samples opened to UV. A comparison between post-flight and adapted during 2.5 years KMCs showed that the initial structure of the community was not restored completely.

This study demonstrates that the Kombucha complex communities can experience and resist severe stress, like that imposed by space and Mars-like conditions. Moreover, key KMC species have revived despite the harsh conditions and provided the community with the needed genes to form a three-dimensional cellulose-based hub [70]. These results encourage us to consider the KMC as a promising, robust micro-ecosystem that provides astronauts with probiotics, food, and biomaterials (cellulose) during long-distance space missions.

In the genome of *K. oboediens* IMBG180, a key bacterium of the KMC IMBG-1, islands of symbiosis and metabolic and virulence islands were found. However, they defected with any genes lost [78]. Again, the Rho transcription terminator gene was detected for prion-like proteins, but the Rho cPrD (prion-forming) domain was not found in the IMBG180 genome. This may mean that Rho does not behave like a prion in IMBG180. The genome has two plasmids that differ in sequence length. Two CRISPR-Cas systems were identified in the genome of IMBG strains of *K. oboediens* (both reference and post-flight), which were classified as CAS-VI-B and CAS-III-D. The only difference between the isolates was the position of some *cas* genes along the genome sequence. In the KMC metagenome, we found that the antibiotic resistome (total number of antibiotic-resistance genes) enriched in space-exposed samples, probably, in the same way as the genes involved in the UvrABC system because of the increased richness in bacterial community induced by spaceflight factors from latent state [74]. This finding indicates that we will pay more attention to mobile genetic elements and antibiotic resistance studies in bacteria from fermented foods.

The space-exposed bacteria's genome was compared with the ground-based reference genome to understand the genome stability of *K. oboediens* dur-

ing a long-time exposure under extraterrestrial conditions. Slight differences in size, total gene prediction, the total number of protein-coding genes, and other features between samples were determined. A remarkable similarity between strains in sequenced genomes was noticed. Results suggest that the genomes of *K. oboediens* IMBG180 (ground sample) and *K. oboediens* IMBG185 (space-exposed) are remarkably similar in topology. Nonetheless, there was a difference in the length of plasmids and the location of the *cas* genes. Despite these differences, they do not affect metabolic profiles. Minor changes were observed in central carbohydrate and energy metabolism pathways, gene numbers, or sequence completeness. These findings suggest that *K. oboediens* maintains its genome stability and functionality in the KMC exposed to the space/Mars-like environment.

Limitations for therapeutic microbes. More questions than answers before traveling to Mars. The criteria used for probiotics selection are highly stringent: to be Generally Recognized As Safe (GRAS); to survive through the gastrointestinal tract and to colonize it, finally; to tolerate low pH and bile salts; to produce antimicrobials and inhibit pathogens; do not possess transferable antibiotic-resistance genes; to be of human origin (summarized in [26]). Some of these traits, e.g., the efficacy of probiotics to integrate into the host gut ecosystem, is variable [44]. One of the shortcomings of wild-type probiotics is their non-specificity. However, a given probiotic could be engineered to exhibit species-specific inhibition of the pathogen and its associated infection [64]. The long-term stability of lactic acid bacteria starters for probiotics production during extended space missions could be problematic because of the impact of radiation [93]. Probably, spores of bacilli and cells of probiotics naturally incorporated into cellulose fibers might be used for in-flight probiotic/synbiotic food production [32, 50].

Despite progress in researching various microbiomes as candidates for microbial therapeutics, technologies exploiting a microbial structure and function remain limited and need to be enhanced by significant interdisciplinary collaborative efforts. The design of efficient living therapeutics is considered revolutionary [17]. However, for these discoveries, humankind will spend a long time in labs

and debates, but before traveling to Mars, we have a shortage of time. Meantime, astronauts cannot be on a long-distance mission without the support of their gut microbiome by biologicals. Postbiotics as non-alive biologicals can be considered the interim stage of probiotics usage in the prophylaxis of health disorders of crewmembers during spaceflights. The term «postbiotics» as a promising inanimate MV-based means for astronauts has been coined in our research [53, 70].

3. POSTBIOTICS BASED ON EXTRACELLULAR MEMBRANE VESICLES AS AN INTERIM SOLUTION BEFORE THE MICROBIAL THERAPY ERA IN ASTROMEDICINE

According to the International Scientific Association for Probiotics and Prebiotics, a postbiotic is «a preparation of inanimate microorganisms and/or their components that confers a health benefit on the host» [76]. Postbiotics refer to probiotic-derived products obtained from food-grade microorganisms that confer health benefits when administered in adequate amounts [10]: secreted by viable cells metabolites, its by-products, the products of cell lysis [94], and cell nanostructures such as extracellular membrane vesicles [40, 70]. Research indicates that postbiotics can have direct immunomodulatory and clinically relevant effects [40, 70].

Microbiota-secreted membrane vesicles are critical players in microbe-host communication. Extracellular membrane vesicles are nanoscale structures formed by a living cell and released into the extracellular space to perform biological functions [33, 87] (Fig. 1A, B). MVs carry membrane and cytoplasmic proteins, DNA, various classes of RNA, lipids, ATP, and other bioactive molecules between cells of all three domains of life that secrete several types of membrane nanosized vesicles with different physiological properties. Although their biogenesis is different, they are all formed by phospholipid membranes and excreted by cells externally. Theoretically, all types of cells produce heterogeneous populations of MVs and are present in body fluids. MVs are incapable of self-reproduction and have no metabolism but transfer bioactive molecules from one cell to another, including over long distances, overcoming the blood-brain barrier. Due to their unique properties,

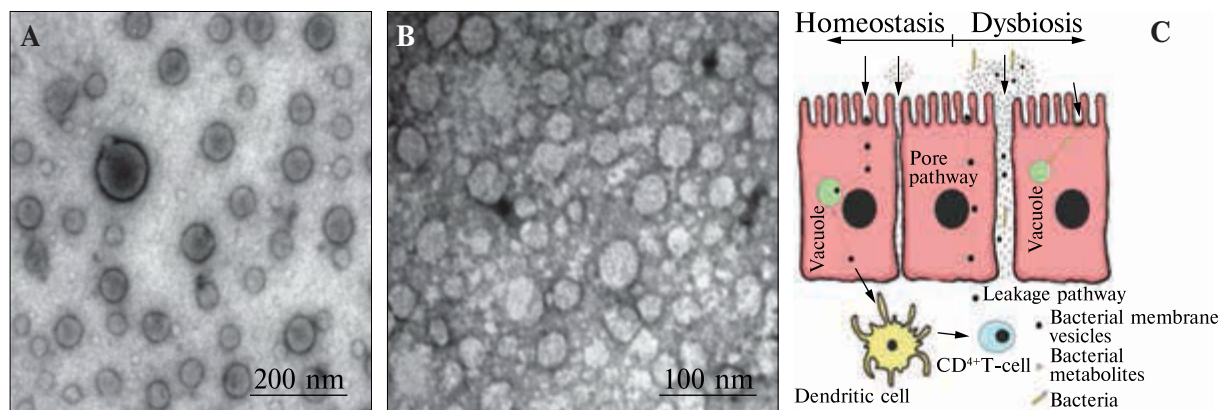


Figure 1. Membrane vesicles (MV)s as a non-cell postbiotic or edible vaccine. A, B — morphology of extracellular membrane vesicles of kombucha community members: from bacteria *Komagataeibacter oboediens* and yeast *Pichia fermentas*, respectively. Transmission electron microscopy. Bars 200 and 100 nm. C — a graphical image of a fragment of the intestinal cell monolayer. MVs are transported into the gut by endocytosis or direct fusion with the cell membrane [13]. Paracellular transport is via either the pore pathway or the leakage pathway. MVs released by the gut bacteria restore the intestinal epithelial barrier function disrupted by enteric pathogens [31]. Local immune dendritic cells exposed to MVs activate naïve T-cells and trigger higher levels of cytokines and specific regulatory miRNAs [25]. The probiotic bacteria MVs facilitate the delivery of bacteriocins to resist pathogens in the host gut [21] and manipulate the host cellular activities via the small RNAs carried as cargo [81]

MVs have become an attractive object of host-microbial research. More and more evidence appears that host-microbial crosstalk is mediated by MVs released by gut microbiota [14, 23–25]. In regenerative medicine, MVs are a promising method of treating various diseases and non-healing wounds [4, 79].

In gram-negative bacteria, MVs are formed by extrusion of outer cell membrane fragments and have been characterized as containing their components: lipopolysaccharides, enzymes, and other proteins, as well as DNA molecules and RNA species [11, 23, 24]. In gram-positive bacteria, vesicles with cytoplasmic contents are extruded through gaps in the cell wall [61] or formed due to prophage activation. Archaea also produce single membrane MVs through a flexible external cell wall-like structure. Unicellular fungi such as yeasts are protected by a thick, well-built cell wall composed of glycoproteins and polysaccharide chitin. This barrier protects them from the external environment and limits the exchange and communication in both directions, including via MVs. A cell wall must be remodeled before MVs cross, so fungal MVs have been reported to contain the cell wall remodeling enzymes [59, 77].

In the gut ecosystem, bidirectional microbiota-host communication does not always depend on

direct cellular contact and is performed by secreted microbial factors, e.g., MVs, that can penetrate the mucous layer and gain access to cells of the intestinal mucosa [46, 55] (Fig. 1C).

Biological functions of bacterial extracellular vesicles in host-microbe interactions. The functions and effects of BMVs on host physiology depend on the diversity of their cargo, and the latter is influenced by bacterial species, growth, and environmental factors. Bacteria package small molecules, proteins, and genetic material into BMVs to provide a supportive environment under interaction with the host [3], e.g., enzymes that aid polysaccharide digestion in the gut or host-indigestible glycans and host mucins [41]. BMVs released by *L. acidophilus* deliver bacteriocins and thus kill pathogenic bacteria [21]. A study shows that gram-negative and gram-positive-derived BMVs deliver DNA into other bacterial cells, mediating horizontal gene transfer. It also facilitates the interaction of transported nucleic acids with their specific intracellular receptors in host cells, triggering the modulation of host immune responses [38]. Besides DNA, some studies have shown the presence of RNAs in BMVs, which protect these fragile molecules. Non-coding small RNAs (sRNA) have important implications for regulating the host immune

system and other cellular processes [47]. Bacterial pathogens translocate bacterial sRNAs packed into BMVs into host cells and use them to affect host defense signaling pathways [75], therefore, mimicking eukaryotic miRNAs that regulate the expression of key sensors and regulators of host immunity. At the same time, host extracellular vesicles use to transfer host miRNA molecules to microbes [11].

BMVs, as mediators of probiotic beneficial effects, are known for their role against pathogens by transferring antimicrobials and modulating host innate and adaptive immunity (summarized in [26]). For example, BMVs produced by probiotic bacteria reduce the increased expression of pro-inflammatory cytokines and down-regulate enzymes associated with injury and inflammation [23, 24, 73]. BMVs from *Escherichia coli* activate dendritic cells and subsequent T-cell responses and protect the intestinal epithelial barrier function [31]. The BMVs from the gut bacteria mediate modulation of dendritic immune cells to coordinate suitable T-cell responses through several mechanisms and influence the release of immune mediators through exosomes, *i.e.*, modulate the exosome cargo [25].

Vesicles from the probiotic bacteria could be a safe free of bacteria strategy to preserve astronauts' health.

A new generation of postbiotics, the BMV-based products, are expected to avoid the risks associated with the administration of living bacteria. BMVs play a role in many of the same activities as parent bacteria, but they have the advantage of access to the blood circulation and the CNS. BMVs so far facilitate the delivery of signaling and fragile molecules, such as sRNA, that could not survive under transportation being unprotected. BMVs from beneficial bacteria can independently influence the host [43] and could be used with concurrent administration with antibiotics and other antimicrobial agents. If oral consumption of live bacteria rapidly leads to circulation of their metabolites or constituents, *e.g.*, bacteriophages, in blood, so far demonstrating the putative effect of their hosts [14], consumption of the BMV-based postbiotics could prevent unwanted elements from entering the bloodstream; it is crucial for astronauts with affected intestines and immunocompromised patients. BMVs have also a set of advantages over both alive and non-viable bacterial cells: they

are quite safe, with reduced risk for adverse effects in vulnerable individuals with an impaired immune system (1); they have no risk for mutations (2); BMVs are not alive and cannot divide (3).

Extracellular membrane vesicles as a component of the KMC secretome. Production of spherical protein-lipid MVs (20-500 nm) by KMC microbial cells is observed in bacteria and yeasts, covering both prokaryotes (gram-negative and gram-positive bacteria) and eukaryotes (yeasts). Fig. 1 shows MVs of bacteria and yeast originating from the kombucha community. The KMC produces six-seven MV populations composed of 50 % of metavesicleome, with two significant populations of MVs of a diameter of 141 and 164 nm, and the rest populations deviate in size. After the revival, laboratory control KMC samples produced MV populations that resembled the initial KMC, the MVs of exposed KMCs were characterized by different sizes and numbers of fractions, depending on the nature of stressors influenced. For example, MVs from post-UV-protected KMC samples did not possess small-size fraction vesicles but contained two significant populations with MVs diameters of 164 and 190 nm, demonstrating a shift in the MV average sizes. In contrast, MVs from unprotected samples produced more smaller-size MV populations. Most tested vesicle populations appeared to be of a single membrane; however, outer-inner bacterial vesicles were also detected. Some deformations in vesicles and their aggregations were observed in the KMC-exposed samples, exhibiting changes in the membrane lipidome. Membrane lipids such as sterols, fatty acids (FAs), and phospholipids (PLs) were modulated under the Mars-like stressors, and a level of saturated FAs increased, as well as both short-chain saturated and trans FAs appeared in the membranes of MVs shed by both post-UV-illuminated and protected on the ISS bacteria. The relative content of zwitterionic and anionic PLs changed, producing a change in surface properties of outer membranes, thereby resulting in a loss of interaction capability with polynucleotides. The changed composition of membranes promoted changes in MV fitness. Biochemical characterization of the membrane-associated enzymes revealed increased activity (DNases, dehydrogenases) compared to wild type. Other functional membrane-associated capabilities

of MVs (e.g., proton accumulation) were also altered after exposure to the spaceflight stressors.

KMC MVs do not acquire the toxicity under Mars-like stressors simulated on the LEO. Changes in microbial membranes inevitably affect their communication with hosts. Both commensal and pathogenic gram-negative bacteria have developed various interaction mechanisms with host cells, such as the formation of BMVs, which can interact with host cell receptors and deliver cargo to their remote targets, e.g., intestinal DNA-containing BMVs readily pass through obese gut barrier and deliver microbial DNAs into β cells, resulting in elevated inflammation and impaired insulin secretion [35]. The study of the impact of altered bionanostructures on the host *in vitro* and *in vivo* scenarios will be a vital task of Astromedicine in the development of new solutions for the intestinal microbiota health of astronauts. In our project, we show that, despite the change in the structure of cell membranes, MVs isolated from the irradiated on LEO KMCs in the BIOMEX did not show endotoxicity, cytotoxicity, and possibly neuromodulation [71]. Treatment of murine embryonal fibroblasts and macrophages by MVs/KMC at concentrations of 0.05–50.0 $\mu\text{g/L}$ did not affect cell growth (BMVs act in femtomole concentrations, 10^{-15} of a mole) [71]. Incubation of BMV/*K. oboediens* with human cell culture COLO205 also did not show cytotoxicity, both from spaceflight and control samples of KMC [71]. MVs isolated from the ground control KMC showed a 50-times lower level of endotoxin activity in the endotoxin test compared to *E. coli*, which was used as a positive control. The level of metavesiculome endotoxin activity from post-flight unprotected KMC samples was 6 times lower than *E. coli*. The levels of endotoxin activity of BMV/*K. oboediens* from both protected and unprotected KMC were almost the same as the activity of BMV of the reference KMC. MVs of post-flight KMCs did not increase the level of L-[^{14}C] glutamate neurotransmitter in synaptosome suspensions in the nerve terminals of the rat brains, i.e., do not acquire neuromodulation capacity. Moreover, MVs/UV-unprotected KMCs even reduced the content of L-[^{14}C] glutamate, but MVs from the protected samples of KMC did not differ from MVs of reference KMC [70].

Altogether, our results show that MVs, originating from nonpathogenic gram-negative bacteria might be considered candidates in the design of postbiotics or edible mucosal vaccines for *in situ* production in the extreme environment. Furthermore, these MVs could also be used as suitable drug/gene delivery vectors for applications in Astromedicine.

FUTURE PERSPECTIVES

The crewed missions to Mars and extensive colonization of the red planet are the near future for humankind. Advanced biotechnologies could provide exhausting life-supporting materials aboard spacecraft and in extraterrestrial colonies, as they are based on the rational use of resources and energy, re-utilization, and contribute to health protection [12]. The bioregenerative life support system seeded by small-scale necessities brought from our planet is addressed to deploy the production of fresh life-supporting foods and materials for crews [60, 66]. The current space food system, which uses pre-packaged meals and beverages, has been considered sufficient for a future mission to Mars. Nevertheless, fresh-prepared food in the diet would be reasonable. Fermented foods containing alive microbial cells could solve many problems, such as the protection of normal gut microbiota and a fresh supply of antioxidants, enzymes, radioprotective agents, SCFAs, and vitamins packaged on Earth, which cannot be preserved within long-duration travels [15]. By producing kefir, growing plants and edible flowers, and taking care of Kombucha, crewmembers could get psychological comfort and sustain mental health. NASA is making experiments on the study of the crop functioning for developing new products [22] and producing probiotics [5]. Prospective applications of 3D food printing will play a pivotal role in health improvement and personalized nutrition during space missions [30]: it is believed that fungi, algae, and insects grown in the bioregenerative life support system should be introduced into the astronaut's diet [58].

The microbial production system on board should meet NASA safety guidelines that prescribe no live microorganisms in the product (although fresh surface-sterilized carrots and celeries permitted for use by crews [65] probably contain endophytic bacteria). Spaceflight BioNutrients-1, BioNutrients-2 projects

(NASA) show that microbial cultures may be used safely for fermented foods production, including yogurt and kefir, for crew health [5]. Until now, food safety guidelines do not allow the crew to consume high amounts of live microorganisms, *i.e.*, fermented foods, during spaceflight. Obviously, this should be changed to nowadays trends in science. A set of criteria for the scientific substantiation of health claims on fermented food for production and consumption beyond Earth remain to be addressed. So, new safety protocols (and standards) must be developed for the production and storage of fermented foods for use by crewmembers. It will include a food safety real-time monitoring system designed to identify and control potential hazards during all phases of production and storage to ensure that the fermented food product is free of contamination. The change of a paradigm of acceptance of microorganisms as enemies on the principle of coexistence with them would greatly benefit the creation of a healthy biosphere in alien habitats. Humans are entirely dependent on microbial life and doomed to co-exist with various microbial organisms, therefore, in interplanetary missions, crews will carry hundreds of microbial species associated with their bodies. Around half of the microbial signatures on their habitation surfaces will be represented by crew members' microbiota. In addition, microbes on/inside plants and microbial components of bioregenerative life support systems will create a microbial background aboard spacecraft. In other words, its microbiome is built. The more diverse the microbiota, the more substantial balance of valuable and opportunistic/detrimental counterparts, and the healthier the built microbiome and ecosystem from the standpoint of human health will be established. It would be reasonable to choose beneficial microflora, which is self-organized as a microecosystem based on metabolic symbiosis, cooperation, and competitiveness and which co-evolved for

centuries under the assistance of humans and proved a safe mutualistic coexistence with hosts to diversify the microbiota, *i.e.*, to modulate the microbiome in the artificial ecosystem. Applying competitive exclusion principles may counter-select pathogenic species and prevent further colonization, stably ecologically modulating the microbiome. Some examples show that probiotic-based strategies can rebalance the hospital microbiome, leading to a stable reduction of pathogen contamination and the associated infections (summarized in [19]).

While the use of alive microbial organisms is being debated, microbial MVs from probiotic and gut commensal bacteria or probiotic communities like KMC could be efficient in protective mucosal immunization through oral, nasal, rectal, or vaginal routes. Also, the restoration of normal immune response could be facilitated by mucosal vaccination, using MVs of safe, rationally selected microbial organisms for microbiome-targeting produced *in situ*. Studies with lactic acid bacteria, propionibacteria, and akkermansia have shown that there is reason to believe that some exposure to their MVs might be beneficial in training the nascent immune system and down-regulating inflammations. MV-based products are expected to avoid the risks associated with the administration of live bacteria and are considered the interim stage of probiotic use to prevent crewmembers' health disorders until their safety is proven. Future research on GRAS microbes-derived MVs is needed to open new possibilities for using bioactive therapeutic molecules for crews in space missions.

ACKNOWLEDGMENTS

This project was supported by the National Academy of Sciences of Ukraine Space Research Program (grant 47/2018, 2021, 2022). The authors are grateful to Ms. Victoria Orlovska for graphical design of the Figure C.

REFERENCES

1. Abaci N., Senol Deniz F. S., Orhan I. E. (2022). Kombucha — An ancient fermented beverage with desired bioactivities: A narrowed review. *Food Chemistry*, **10**, 14, 100302. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2022.100302> [in English].
2. Albright M. B. N., Louca S., Winkler D. E., Feeser K. L., Haig S.-J., Whiteson K. L., Emerson J. B., Dunbar J. (2022). Solutions in microbiome engineering: prioritizing barriers to organism establishment. *ISME J.*, **16**, 331–338. <https://doi.org/10.1038/s41396-021-01088-5> [in English].
3. Alves N. J., Turner K. B., Medintz I. L., Walper S. A. (2016). Protecting enzymatic function through directed packaging into bacterial outer membrane vesicles. *Scientific Reports*, **6**, 24866. <https://doi.org/10.1038/srep24866> [in English].
4. Aytar Çelik P., Derkuş B., Erdoğan K., Barut D., Blaise Manga E., Yıldırım Y., Pecha S., Çabuk A. (2022). Bacterial membrane vesicle functions, laboratory methods, and applications. *Biotechnology Adv.*, **54**, 107869. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2021.107869> [in English].
5. Ball N., Kagawa H., Hindupur A., Kostakis A., Hogan J., Villanueva A., et al. (2021). BioNutrients-2: Improvements to the BioNutrients-1 nutrient production system. 50th International Conference on Environmental Systems ICES-2021-331. URL: <https://ttu-ir.tdl.org/bitstream/handle/2346/87260/ICES-2021-331.pdf?sequence=1&isAllowed=y> (Last accessed: 12.07.2022). [in English].
6. Barbanchik G. F. (1954). *Kombucha and its medicinal properties*. Omsk: Omsk Regional Book Publ. House [in Russian].
7. Berg G., Rybakova D., Fischer D., Cernava T., Vergès M.-C. C., Charles T., et al. (2020). Microbiome definition re-visited: old concepts and new challenges. *Microbiome*, **8**, 103. <https://doi.org/10.1186/s40168-020-00875-0> [in English].
8. Bravo J. A., Forsythe P., Chew M. V., Escaravage E., Savignac H. M., Dinan T. G., et al. (2011). Ingestion of *Lactobacillus* strain regulates emotional behavior and central GABA receptor expression in a mouse via the vagus nerve. *Proc. Nat. Acad. Sci.*, **108**(38), 16050–16055. <https://doi.org/10.1073/pnas.1102999108> [in English].
9. Brugiroux S., Beutler M., Pfann C., Garzetti D., Ruscheweyh H.-J., Ring D., et al. (2017). Genome-guided design of a defined mouse microbiota that confers colonization resistance against *Salmonella enterica* serovar Typhimurium. *Nature Microbiol.*, **2**, 16215. <https://doi.org/10.1038/nmicrobiol.2016.215> [in English].
10. Cabello-Olmo M., Araña M., Urtasun R., Encio I. J., Barajas M. (2021). Role of postbiotics in diabetes mellitus: Current knowledge and future perspectives. *Foods*, **10**(7), 1590. <https://doi.org/10.3390/foods10071590> [in English].
11. Cai Q., He B., Wang S., Fletcher S., Niu D., Mitter N., et al. (2021). Message in a bubble: shuttling small RNAs and proteins between cells and interacting organisms using extracellular vesicles. *Ann. Rev. Plant Biol.*, **72**(1), 497–524. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-081720-010616> [in English].
12. Camere S., Karana E. (2018). Fabricating materials from living organisms: An emerging design practice. *J. Cleaner Production*, **186**, 570–584. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.081> [in English].
13. Caruana J. C., Walper S. A. (2020) Bacterial membrane vesicles as mediators of microbe — microbe and microbe — host community interactions. *Front. Microbiol.*, **11**, 432. doi: 10.3389/fmicb.2020.00432
14. Champagne-Jorgensen K., Mian M. F., McVey Neufeld K.-A., Stanisz A. M., Bienenstock J. (2021). Membrane vesicles of *Lactocaseibacillus rhamnosus* JB-1 contain immunomodulatory lipoteichoic acid and are endocytosed by intestinal epithelial cells. *Sci. Reports*, **11**, 13756. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-93311-8> [in English].
15. Cooper M., Perchonok M., Douglas G. L. (2017). Initial assessment of the nutritional quality of the space food system over three years of ambient storage. *npj Microgravity*, **3**, 17. <https://doi.org/10.1038/s41526-017-0022-z> [in English].
16. Costa M. A. C., Vilela D. L. S., Fraiz G. M., Lopes I. L., Coelho A. I. M., Castro L. C. V., Martin J. G. P. (2021) Effect of kombucha intake on the gut microbiota and obesity-related comorbidities: A systematic review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 1–16. <https://doi.org/10.1080/10408398.2021.1995321> [in English].
17. Cruz N., Abernathy G. A., Dichosa A. E. K., Kumar A. (2022). The age of next-generation therapeutic-microbe discovery: Exploiting microbe-microbe and host-microbe interactions for disease prevention. *Infection and Immunity*, **90**, № 5. <https://doi.org/10.1128/iai.00589-21> [in English].
18. Cunningham M., Azcarate-Peril M. A., Barnard A., Benoit V., Grimaldi R., Guyonnet D., Holscher H. D., Hunter K., Manurung S., Obis D., Petrova M. I., Steinert R. E., Swanson K. S., van Sinderen D., Vulevic J., Gibson G. R. (2021). Shaping the future of probiotics and prebiotics. *Trends in Microbiology*, **29**(8), 667–685. <https://doi.org/10.1016/j.tim.2021.01.003>
19. D'Accolti M., Soffritti I., Bini F., Mazziga E., Mazzacane S., Caselli E. (2022). Pathogen control in the built environment: a probiotic-based system as a remedy for the spread of antibiotic resistance. *Microorganisms*, **10**(2), 225. <https://doi.org/10.3390/microorganisms10020225> [in English].
20. de Vera J.-P., Alawi M., Backhaus T., Baqué M., Billi D., Böttger U., et al. (2019). Limits of life and the habitability of Mars: The ESA space experiment BIOMEX on the ISS. *Astrobiology*, **19**(2), 145–157. <https://doi.org/10.1089/ast.2018.1897> [in English].

21. Dean S. N., Rimmer M. A., Turner K. B., Phillips D. A., Caruana J. C., Hervey W. J., Leary D. H., Walper S. A. (2020). Lactobacillus acidophilus membrane vesicles as a vehicle of bacteriocin delivery. *Front. Microbiol.*, **11**, 710. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.00710> [in English].
22. Detrell G., Belz S., Fasoulas S., Helisch H., Keppler J., Henn N., et al. (2018). PBR@LSR: A hybrid life support system experiment at the ISS. *NASA ADS* 42, F4.2-1518 [cited 2022 March 19]. Bibcode: 2018cosp...42E.819D URL: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2018cosp...42E.819D/abstract> (Last accessed: 12.07.2022).
23. Díaz-Garrido N., Badía J., Baldomà L. (2021a). Microbiota-derived extracellular vesicles in interkingdom communication in the gut. *J. Extracellular Vesicles*, **10**(13), e12161. <https://doi.org/10.1002/jev2.12161> [in English].
24. Díaz-Garrido N., Cordero C., Olivo-Martinez Y., Badía J., Baldomà L. (2021). Cell-to-cell communication by host-released extracellular vesicles in the gut: Implications in health and disease. *Int. J. Molecular Sci.*, **22**(4), 2213. <https://doi.org/10.3390/ijms22042213> [in English].
25. Díaz-Garrido N., Badía J., Baldomà L. (2022). Modulation of dendritic cells by microbiota extracellular vesicles influences the cytokine profile and exosome cargo. *Nutrients*, **14**(2), 344. <https://doi.org/10.3390/nu14020344> [in English].
26. Domínguez Rubio A. P., D'Antoni C. L., Piuri M., Pérez O. E. (2022). Probiotics, their extracellular vesicles and infectious diseases. *Frontiers in Microbiology*, **13**, 864720. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.864720> [in English].
27. Duarte-Silva E., Oriá A. C., Mendonça I. P., de Melo M. G., Paiva I. H. R., Maes M., Joca S. R. L., Peixoto C. A. (2022). Tiny in size, big in impact: Extracellular vesicles as modulators of mood, anxiety and neurodevelopmental disorders. *Neuroscience Biobehavioral Reviews*, **135**, 104582. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2022.104582> [in English].
28. Eckburg P. B. (2005). Diversity of the human intestinal microbial flora. *Science*, **308**(5728), 1635–1638. <https://doi.org/10.1126/science.1110591> [in English].
29. Elshagabee F. M. F., Rokana N. (2022). Mitigation of antibiotic resistance using probiotics, prebiotics and synbiotics. *A review. Environmental Chemistry Lett.*, **20**(2), 1295–1308. <https://doi.org/10.1007/s10311-021-01382-w> [in English].
30. Escalante Aburto A., Trujillo de Santiago G., Álvarez M. M., Chuck Hernández C. (2021). Advances and prospective applications of 3D food printing for health improvement and personalized nutrition. *Comprehensive Revs Food Sci. and Food Safety*, **20**(6), 5722–5741. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12849> [in English].
31. Fábrega M.-J., Rodríguez-Nogales A., Garrido-Mesa J., Algieri F., Badía J., Giménez R., Gálvez J., Baldomà L. (2017). Intestinal anti-inflammatory effects of outer membrane vesicles from Escherichia coli Nissle 1917 in DSS-experimental colitis in mice. *Frontiers in Microbiology*, **8**, 1274. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.01274> [in English].
32. Fajardo-Cavazos P., Nicholson W. L. (2021). Shelf life and simulated gastrointestinal tract survival of selected commercial probiotics during a simulated round-trip journey to Mars. *Frontiers in Microbiology*, **12**, 748950. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.748950> [in English].
33. Fang Y., Wang Z., Liu X., Tyler B. M. (2022). Biogenesis and biological functions of extracellular vesicles in cellular and organismal communication with microbes. *Frontiers in Microbiology*, **13**, 817844. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.817844> [in English].
34. Ferreiro A., Crook N., Gasparrini A. J., Dantas G. (2018). Multiscale evolutionary dynamics of host-associated microbiomes. *Cell*, **172**(6), 1216–1227. <https://doi.org/10.1016/j.cell.2018.02.015> [in English].
35. Gao H., Luo Z., Ji Y., et al. (2022). Accumulation of microbial DNAs promotes to islet inflammation and β cell abnormalities in obesity in mice. *Nature Communications*, **13**(1), 565. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-28239-2>. [in English].
36. Garrett-Bakelman F. E., Darshi M., Green S. J., Gur R. C., Lin L., Macias B. R., et al. (2019). The NASA Twins Study: A multidimensional analysis of a year-long human spaceflight. *Science*, **364**(6436), eaau8650. <https://doi.org/10.1126/science.aau8650> [in English].
37. Gill S. R., Pop M., DeBoy R. T., Eckburg P. B., Turnbaugh P. J., Samuel B. S., et al. (2006). Metagenomic analysis of the human distal gut microbiome. *Science*, **312**(5778), 1355–1359. <https://doi.org/10.1126/science.1124234> [in English].
38. Gilmore W. J., Johnston E. L., Zavan L., Bitto N. J., Kaparakis-Liaskos M. (2021). Immunomodulatory roles and novel applications of bacterial membrane vesicles. *Molecular Immunology*, **134**, 72–85. <https://doi.org/10.1016/j.molimm.2021.02.027> [in English].
39. Góes-Neto A., Kukharenska O., Orlovska I., Podolich O., Imchen M., Kumavath R., et al. (2021). Shotgun metagenomic analysis of Kombucha mutualistic community exposed to Mars-like environment outside the International Space Station. *Environmental Microbiology*, **23**(7), 3727–3742. <https://doi.org/10.1111/1462-2920.15405> [in English].
40. Gu Z., Meng S., Wang Y., Lyu B., Li P., Shang N. (2022). A novel bioactive postbiotics: from microbiota-derived extracellular nanoparticles to health promoting. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 1–15. <https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2039897> [in English].
41. Gul L., Modos D., Fonseca S., Madgwick M., Thomas J. P., Sudhakar P., et al. (2022). Extracellular vesicles produced by the human commensal gut bacterium Bacteroides thetaiotaomicron affect host immune pathways in a cell-type spe-

- cific manner that are altered in inflammatory bowel disease. *J. Extracell. Vesicles*, **11**(1), e12189. <https://doi.org/10.1002/jev2.12189> [in English].
42. Gupta R., Raghuvanshi S. (2022). *Designer probiotics in metabolic disorders*. Probiotic research in therapeutics. Eds K. Chopra, M. Bishnoi, K. K. Kondepudi. Singapore: Springer, 241–260. https://doi.org/10.1007/978-981-16-8444-9_12 [in English].
 43. Haas-Neill S., Forsythe P. (2020). A budding relationship: Bacterial extracellular vesicles in the microbiota-gut-brain axis. *Int. J. Molecular Sci.*, **21**(23), 8899. <https://doi.org/10.3390/ijms21238899> [in English].
 44. Han S., Lu Y., Xie J., Fei Y., Zheng G., Wang Z., et al. (2021). Probiotic gastrointestinal transit and colonization after oral administration: A long journey. *Frontiers in cellular and infection. Microbiology*, **11**, 609722. <https://doi.org/10.3389/fcimb.2021.609722> [in English].
 45. Haraoui L.-P. (2022). Networked collective microbiomes and the rise of subcellular 'units of life'. *Trends in Microbiology*, **30**(2), 112–119. <https://doi.org/10.1016/j.tim.2021.09.011> [in English].
 46. Jones E. J., Booth C., Fonseca S., Parker A., Cross K., Miquel-Clopés A., et al. (2020). The uptake, trafficking, and biodistribution of kombucha thetaiotaomicron generated outer membrane vesicles. *Frontiers in Microbiology*, **11**, 57. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.00057> [in English].
 47. Joshi B., Singh B., Nadeem A., Askarian F., Wai S. N., Johannessen M., Hegstad K. (2021). Transcriptome profiling of staphylococcus aureus associated extracellular vesicles reveals presence of small RNA-Cargo. *Frontiers in Molecular Biosciences*, **7**, 566207. <https://doi.org/10.3389/fmolb.2020.566207> [in English].
 48. Jung Y., Kim I., Mannaa M., Kim J., Wang S., Park I., Kim J., Seo Y. S.. (2019). Effect of Kombucha on gut-microbiota in mouse having nonalcoholic fatty liver disease. *Food Sci. and Biotechnology*, **28**, 261–7. <https://doi.org/10.1007/s10068-018-0433-y> [in English].
 49. Khan Mirzaei M., Deng L. (2022). New technologies for developing phage-based tools to manipulate the human microbiome. *Trends in Microbiology*, **30**(2), 131–142. <https://doi.org/10.1016/j.tim.2021.04.007> [in English].
 50. Kozyrovska N., Reva O., Podolich O., Kukhareno O., Orlovska I., Terzova V., et al. (2021). To other planets with upgraded millennial kombucha in rhythms of sustainability and health support. *Frontiers in Astron. and Space Sci.*, **8**, 701158. <https://doi.org/10.3389/fspas.2021.701158> [in English].
 51. Kozyrovska N., Foing B. (2010). Kombucha might be promising probiotics for consumption on the Moon. *Abstract book COSPAR*, **38**, 3. (38th COSPAR Scientific Assembly, Bibcode 2010cosp. 38..434K) [in English].
 52. Kozyrovska N. O., Reva O. M., Goginyan V. B., de Vera J. P. (2012). Kombucha microbiome as a probiotic: a view from the perspective of post-genomics and synthetic ecology. *Biopolymers and Cell*, **28**(2), 103–113. <https://doi.org/10.7124/bc.000034> [in English].
 53. Kozyrovska N., Foing B., Demets R., de Vera J.-P. (2018). *Are postbiotics a reasonable alternative to probiotics for astronaut's health support*. 18th Ukrainian conf. on Space research (Kiev, Ukraine, September 17–20). Abstracts, 65 [in English].
 54. Kuehnast T., Abbott C., Pausan M. R., Pearce D. A., Moissl-Eichinger C., Mahnert A. (2022). The crewed journey to Mars and its implications for the human microbiome. *Microbiome*, **10**, 26. <https://doi.org/10.1186/s40168-021-01222-7> [in English].
 55. Ladinsky M. S., Araujo L. P., Zhang X., Veltri J., Galan-Diez M., Soualhi S., et al. (2019). Endocytosis of commensal antigens by intestinal epithelial cells regulates mucosal T cell homeostasis. *Science*, **363**(6431), eaat4042. <https://doi.org/10.1126/science.aat4042> [in English].
 56. Lee J. A., Brecht J. K., Castro-Wallace S., Donovan F. M., Hogan J. A., Tie Liu, Massa G. D., Parra M., Sargent S. A., Mark Settles A., Nitin Kumar Singh, Yo-Ann Velez Justiniano, Kasthuri Venkateswaran (2022). Microbial food safety in space production systems A white paper submitted to the decadal survey on biological and physical sciences research in space 2023-2032 NASA. URL: https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20210023206/downloads/Lee_MicrobialFoodSafety_WhitePaper_211021.pdf (Last. accessed: 12.07.2022) [in English].
 57. Lencner A. A., Lencner C. P., Mikelsaar M. E., Tjuri M. E., Toom M. A., Vijaots M. E., et al. (1984). Die quantitative Zusammensetzung der Lactoflora des Verdauungstrakts vor und nach kosmischen Fl gen unterschiedlicher Dauer. *Food/Nahrung*, **28**(6-7), 607–613. <https://doi.org/10.1002/food.19840280608> [in English].
 58. Lewandowski K., Stryjska A. (2022). What food will we be eating on our journey to Mars? *Biotechnology Biotechnological Equipment*, **36**(1), 165–175. <https://doi.org/10.1080/13102818.2022.2060135> [in English].
 59. Liebana-Jordan M., Brotons B., Falcon-Perez J. M., Gonzalez E. (2021). Extracellular vesicles in the Fungi Kingdom. *Int. J. Molecular Sci.*, **22**(13), 7221. <https://doi.org/10.3390/ijms22137221>. [in English].
 60. Liu H., Yao Z., Fu Y., Feng J. (2021). Review of research into bioregenerative life support system(s) which can support humans living in space. *Life Sci. in Space Res.*, **31**, 113–120. <https://doi.org/10.1016/j.lssr.2021.09.003> [in English].
 61. Liu Y., Tempelaars M. H., Boeren S., Alexeeva S., Smid E. J., Abee T. (2022). Extracellular vesicle formation in *Lactococcus lactis* is stimulated by prophage-encoded holin-lysin system. *Microbial Biotechnology*, **15**(4), 1281–1295. <https://doi.org/10.1111/1751-7915.13972> [in English].

62. Liu Z., Luo G., Du R., Sun W., Li J., Lan H., et al. (2020). Effects of spaceflight on the composition and function of the human gut microbiota. *Gut Microbes*, **11**(4), 807–819. <https://doi.org/10.1080/19490976.2019.1710091> [in English].
63. Maldonado Galdeano C., Cazorla S. I., Lemme Dumit J. M., Vélez E., Perdigón G. (2019). Beneficial effects of probiotic consumption on the immune system. *Ann. Nutrition and Metabolism*, **74**(2), 115–124. <https://doi.org/10.1159/000496426> [in English].
64. Mathipa-Mdakane M. G., Thantsha M. S. (2022). *Lacticaseibacillus rhamnosus*: A suitable candidate for the construction of novel bioengineered probiotic strains for targeted pathogen control. *Foods*, **11**(6), 785. <https://doi.org/10.3390/foods11060785> [in English].
65. Mhalaskar S., Phad O., Phadtare N. (2021). Space food and beverage. *FASJ*, **2**(01), 57. URL: <https://fasj.org/index.php/fasj/article/view> (Last. accessed: 12.07.2022) [in English].
66. Mitchell C. A. (1994). Bioregenerative life-support systems. *Amer. J. Clinical Nutrition*, **60**(5), 820S–824S. <https://doi.org/10.1093/ajcn/60.5.820s> [in English].
67. Morreale C., Bresesti I., Bosi A., Baj A., Giaroni C., Agosti M., Salvatore S. (2022). Microbiota and pain: Save your gut feeling. *Cells*, **11**(6), 971. <https://doi.org/10.3390/cells11060971> [in English].
68. Morrison M. D., Thissen J. B., Karouia F., Mehta S., Urbaniak C., Venkateswaran K., et al. (2021). Investigation of spaceflight induced changes to astronaut microbiomes. *Frontiers in Microbiology*, **12**, 659179. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.659179> [in English].
69. Pirolli N. H., Bentley W. E., Jay S. M. (2021). Bacterial extracellular vesicles and the gut-microbiota brain axis: Emerging roles in communication and potential as therapeutics. *Adv. Biology*, **5**(7), 2000540. <https://doi.org/10.1002/adbi.202000540> [in English].
70. Podolich O., Kukharenko O., Haidak A., Zaets I., Zaika L., Storozhuk O., et al. (2019). Multimicrobial kombucha culture tolerates Mars-like conditions simulated on low Earth orbit. *Astrobiology*, **19**(2), 183–196. <https://doi.org/10.1089/ast.2017.1746> [in English].
71. Podolich O., Kukharenko O., Zaets I., Orlovska I., Palchykovska L., Zaika L., et al. (2020). Fitness of outer membrane vesicles from *Komagataeibacter intermedius* is altered under the impact of simulated Mars-like stressors outside the International Space Station. *Frontiers in Microbiology*, **11**, 1268. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.01268> [in English].
72. Qin J., Li R., Raes J., Arumugam M., Burgdorf K. S., Manichanh C., et al. (2010). A human gut microbial gene catalogue established by metagenomic sequencing. *Nature*, **464**(7285), 59–65. <https://doi.org/10.1038/nature08821> [in English].
73. Rodovalho V. d. R., Luz B. S. R. d., Rabah H., do Carmo F. L. R., Folador E. L., Nicolas A., et al. (2020). Extracellular vesicles produced by the probiotic *Propionibacterium freudenreichii* CIRM-BIA 129 mitigate inflammation by modulating the NF- κ B pathway. *Frontiers in Microbiology*, **11**, 1544. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.01544> [in English].
74. Sabatino R., Scaffi T., Corno G., de Carvalho D. S., Uetanabaro A. P.T., Góes-Neto A., et al. (2022). Metagenome analysis reveals a response of the antibiotic resistome to Mars-like extraterrestrial conditions. *Astrobiology*, **22** (10). DOI: 10.1089/ast.2021.0176 [in English].
75. Sahr T., Escoll P., Rusniok C., Bui S., Pehau-Arnaudet G., Lavieu G., Buchrieser, C. (2022). Translocated *Legionella pneumophila* small RNAs mimic eukaryotic microRNAs targeting the host immune response. *Nature Communications*, **13**(1), 762. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-28454-x> [in English].
76. Salminen S., Collado M. C., Endo A., Hill C., Lebeer S., Quigley E. M. M., et al. (2021). The International Scientific Association of Probiotics and Prebiotics (ISAPP) consensus statement on the definition and scope of postbiotics. *Nature Reviews Gastroenterology Hepatology*, **18**(9), 649–667. <https://doi.org/10.1038/s41575-021-00440-6> [in English].
77. Samuel M., Bleackley M., Anderson M., Mathivanan S. (2015). Extracellular vesicles including exosomes in cross kingdom regulation: a viewpoint from plant-fungal interactions. *Frontiers in Plant Science*, **6**, 766. <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00766> [in English].
78. Santana de Carvalho D., Trovatti Uetanabaro A. P., Kato R. B., Aburjaile F. F., Jaiswal A. K., Profeta R., et al. (2022). The space-exposed kombucha microbial community member *Komagataeibacter oboediens* showed only minor changes in its genome after reactivation on Earth. *Frontiers in Microbiology*, **13**, 782175. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.782175> [in English].
79. Sartorio M. G., Pardue E. J., Feldman M. F., Haurat M. F. (2021). Bacterial outer membrane vesicles: From discovery to applications. *Ann. Rev. Microbiology*, **75**, 609–630. <https://doi.org/10.1146/annurev-micro-052821-031444> [in English].
80. Siddiqui R., Akbar N., Khan N. A. (2020). Gut microbiome and human health under the space environment. *J. Appl. Microbiology*, **130**(1), 14–24. <https://doi.org/10.1111/jam.14789> [in English].
81. Stanton B.A. (2021) Extracellular vesicles and host-pathogen interactions: A review of inter-kingdom signaling by small noncoding RNA. *Genes*, **12**(7), 1010. <https://doi.org/10.3390/genes12071010> [in English].

82. Suez J., Zmora N., Zilberman-Schapira G., Mor U., Dori-Bachash M., Bashardes S., et al. (2018). Post-antibiotic gut mucosal microbiome reconstitution is impaired by probiotics and improved by autologous FMT. *Cell*, **174**(6), 1406–1423. <https://doi.org/10.1016/j.cell.2018.08.047> [in English].
83. Szlufman C., Shemesh M. (2021). Role of probiotic bacilli in developing synbiotic food: Challenges and opportunities. *Frontiers in Microbiology*, **12**, 638830. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.638830> [in English].
84. Taur Y., Coyte K., Schluter J., Robilotti E., Figueroa C., Gjonbalaj M., et al. (2018). Reconstitution of the gut microbiota of antibiotic-treated patients by autologous fecal microbiota transplant. *Sci. Transl. Med.*, **10**(460), eaap9489. <https://doi.org/10.1126/scitranslmed.aap9489> [in English].
85. Tesei D., Jewczynko A., Lynch A., Urbaniak C. (2022). Understanding the Complexities and Changes of the Astronaut Microbiome for Successful Long-Duration Space Missions. *Life*, **12**(4), 495. <https://doi.org/10.3390/life12040495> [in English].
86. Thapa S. P., Koirala S., Anal A. K. (2022). Potential of probiotics as alternative sources for antibiotics in food production systems. Eds Parmjit Singh Panesar, Anil Kumar Anal. <https://doi.org/10.1002/9781119702160.ch8>
87. Théry C., Witwer K. W., Aikawa E., Alcaraz M. J., Anderson J. D., Andriantsitohaina R., et al. (2018). Minimal information for studies of extracellular vesicles 2018 (MISEV2018): A position statement of the International Society for Extracellular Vesicles and update of the MISEV2014 guidelines. *J. Extracellular Vesicles*, **7**(1), 1535750. <https://doi.org/10.1080/20013078.2018.1535750> [in English].
88. Turrone S., Magnani M., KC P., Lesnik P., Vidal H., Heer M. (2020). Gut microbiome and space travelers' health: State of the art and possible pro/prebiotic strategies for long-term space missions. *Frontiers in Physiology*, **11**, 553929. <https://doi.org/10.3389/fphys.2020.553929> [in English].
89. Vargas B. K., Fabricio M. F., Záchia Ayub M. A. (2021). Health effects and probiotic and prebiotic potential of Kombucha: A bibliometric and systematic review. *Food Bioscience*, **44** (5A), 101332. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2021.101332> [in English].
90. Voorhies A. A., Mark Ott, C., Mehta S., Pierson D. L., Crucian B. E., Feiveson A., Oubre C. M., et al. (2019). Study of the impact of long-duration space missions at the International Space Station on the astronaut microbiome. *Scientific Reports*, **9**, 9911. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-46303-8> [in English].
91. Wang J. W., Kuo C. H., Kuo F. C., Wang Y. K., Hsu W. H., et al. (2019). Fecal microbiota transplantation: Review and update. *J Formos Med Assoc.*, **118** Suppl 1, S23-S31. <https://doi.org/10.1016/j.jfma.2018.08.011>
92. Wang P., Feng Z., Sang X., Chen W., Zhang X., Xiao J., et al. (2021). Kombucha ameliorates LPS-induced sepsis in a mouse model. *Food Function*, **12**, 10263–10280. <https://doi.org/10.1039/d1fo01839f> [in English].
93. Watkins P., Hughes J., Gamage T. V., Knoerzer K., Ferlazzo M. L., Banati R. B. (2022). Long term food stability for extended space missions: a review. *Life Sci. in Space Res.*, **32**, 79–95. <https://doi.org/10.1016/j.lssr.2021.12.003> [in English].
94. Wegh C. A. M., Geerlings S. Y., Knol J., Roeselers G., Belzer C. (2019). Postbiotics and their potential applications in early life nutrition and beyond. *Int. J. Molecular Sci.*, **20**(19), 4673. <https://doi.org/10.3390/ijms20194673> [in English].
95. Wieërs G., Verbelen V., Van Den Driessche M., Melnik E., Vanheule G., Marot J.-C., Cani P. D. (2021). Do probiotics during in-hospital antibiotic treatment prevent colonization of gut microbiota with multi-drug-resistant bacteria? A randomized placebo-controlled trial comparing saccharomyces to a mixture of lactobacillus, bifidobacterium, and saccharomyces. *Frontiers in Public Health*, **8**, 578089. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2020.578089> [in English].
96. Xu S., Wang Y., Wang J., Geng W. (2022). Kombucha reduces hyperglycemia in type 2 diabetes of mice by regulating gut microbiota and its metabolites. *Foods*, **11**(5), 754. <https://doi.org/10.3390/foods11050754> [in English].
97. Yan F., Polk D. B. (2011). Probiotics and immune health. *Current Opinion in Gastroenterology*, **27**(6), 496–501. <https://doi.org/10.1097/mog.0b013e32834baa4d> [in English].
98. Zawistowska-Rojek A., Tyski S. (2022). How to improve health with biological agents — Narrative review. *Nutrients*, **14**(9), 1700. <https://doi.org/10.3390/nu14091700> [in English].

Стаття надійшла до редакції 12.07.2022

Після доопрацювання 12.07.2022

Прийнято до друку 10.08.2022

Received 12.07.2022

Revised 12.07.2022

Accepted 10.08.2022

*I. Орловська*¹, мол. наук. співроб.

ORCID.org/0000-0002-3016-049X

E-mail: i.vviki@ukr.net,

*O. Подоліч*¹, наук. співроб., канд. біол. наук

ORCID.org/0000-0002-37715

E-mail: podololga@ukr.net

*O. Кухаренко*¹, наук. співроб., канд. техн. наук

ORCID.org/0000-0002-0944-5415

E-mail: hikia48@gmail.com,

*Г. Зубова*¹, мол. наук. співроб.,

ORCID.org/0000-0002-0514-2695B

E-mail: anka.kiev@gmail.com

*O. Рева*², д-р наук, проф.

ORCID.org/0000-0002-5459-2772

E-mail: oleg.reva@up.ac.za,

*A. ді Сезде*³, наук. співроб.

ORCID.org/0000-0002-5481-6182

E-mail: andrea.dicesare@cnr.it,

*A. Гоеc-Нето*⁴, д-р наук, проф.

ORCID.org/0000-0002-7692-6243

E-mail: arigoesneto@icb.ufmg.br,

*V. Азеведо*⁵, д-р наук, проф., Титулярний член Бразильської академії наук

ORCID.org/0000-0002-4775-2280

E-mail: vascoariston@gmail.com,

Д. Бар^{5,6}, д-р наук, запрошений професор (біоінформатика)

ORCID.org/0000-0002-2557-7768

E-mail: dr.barh@gmail.com

*Ж.-П. де Вега*⁷, кер. відділу, д-р наук

ORCID.org/0000-0002-9530-5821

E-mail: jean-pierre.devera@dlr.de,

*Н. Козировська*¹, кер. лаб., канд. біол. наук

ORCID.org/0000-0002-2849-3471

E-mail: kozyrgna@ukr.net

¹ Інститут молекулярної біології і генетики Національної академії наук України
вул. Академіка Заболотного 150, Київ, Україна, 03143

² Центр біоінформатики та обчислювальної біології, каф. біохімії, генетики та мікробіології; Університет Преторії
Лінвуд Роуд, Гатфілд, Преторія, 0002 Південна Африка

³ Національна дослідницька рада Італії — Інститут дослідження води (CNR-IRSA)
Корсо Тоноллі, 50, 28922 Палланца, Вербанія, Італія

⁴ Державний університет Санта-Крус, кампус Соан Назаре де Андраде
Шосе Хорхе Амаду, км 16, район Салобрінью Ільеус, Бразилія

⁵ Інститут біологічних наук, Федеральний університет Мінас-Жерайс, відділ генетики, екології та еволюції
Антоніо Карлос, 6627, Пампуля, Белу-Оризонті, Мінас-Жерайс, Бразилія

⁶ Центр геноміки та прикладної генної технології, Інститут інтегративної омїки та прикладної біотехнології
Нонакурі, Пурба Медініпур, WB-721172, Індія

⁷ Центр підтримки користувачів мікрогравітації, Німецький аерокосмічний центр (DLR)
Ліндюер Хьое, 51147 Кельн, Німеччина

КОНЦЕПТУАЛЬНИЙ ПІДХІД ДО ВИКОРИСТАННЯ ПОСТБІОТИКІВ НА ОСНОВІ БАКТЕРІЙНИХ МЕМБРАННИХ НАНОВЕЗИКУЛ ДЛЯ ПРОФІЛАКТИКИ РОЗЛАДІВ ЗДОРОВ'Я КОСМОНАВТІВ

Функціональні продукти, що містять живі мікроорганізми та їхні компоненти, необхідні для нормального функціонування організму людини, оскільки нормальна мікробіота кишечника потребує підживлення від інших мікробних організмів та їхніх наноструктур — мембранних везикул (МВ), що виділяються назовні. Це дослідження було започатковано концепцією, що МВ можуть робити свій внесок у здоров'я астронавтів так само, як і їхні батьківські

клітини, і стати тимчасовою заміною живих мікробних клітин, поки не стане відомо більше про поведінку мікробів у космічному середовищі. Перевага МВ полягає в тому, що вони є неживими і не зазнають змін за несприятливих умов, як це може відбуватись із мікробними організмами. Як модель ми вибрали МВ стійкої до факторів навколишнього середовища мультимікробної культури комбучі (МКК), відомої своїми оздоровчими властивостями для людини. На початковому етапі перевірки концепції ми експонували МКК на Міжнародній космічній станції в гібридному космічному/марсоподібному середовищі. Культура комбучі пережила тривалий період експонування, а МВ, утворені членами угруповання МКК після польоту, не набули токсичності, незважаючи на змінений склад їхніх мембран після перебування в середовищі, що імітувало умови поверхні Марса. Це спостереження разом з нашими метагеномним та порівняльними геномними аналізами МКК та домінантної бактерії угруповання комбучі — *Komagataeibacter oboediens* — показали, що геноми наземного та експонованого в космосі зразків були подібними за топологією та стабільністю. На наступному етапі ми розпочали оцінку придатності та безпечності МВ післяпольотного *K. oboediens* і показали, що вони були змінені, але зміни в структурі їхніх мембран не призвели до набуття ними цитотоксичності. Наша стратегія підтвердження концепції обговорюється в цьому огляді відповідно до даних літератури.

Ключові слова: постбіотики, екстрацелюлярні мембранні везикули, мультимікробна культура комбуча, функціональне харчування, зміцнення здоров'я.

<https://doi.org/10.15407/knit2022.06.052>

УДК 523.3-36:523.43-36:577.112.384.4:577.175.82:612.815.1

А. О. ПАСТУХОВ, наук. співроб., канд. біол. наук

ORCID: 0000-0001-5837-6412

Н. В. КРИСАНОВА, старш. наук. співроб., канд. біол. наук

Н. Г. ПОЗДНЯКОВА, старш. наук. співроб., канд. біол. наук

ORCID: 0000-0001-9922-5389

А. А. БОРИСОВ, пров. інж.

Р. В. СІВКО, наук. співроб., канд. біол. наук

А. Г. НАЗАРОВА, пров. інж.

Л. М. КАЛИНОВСЬКА, аспірант

ORCID: 0000-0002-3741-7040

Т. О. БОРИСОВА, зав. відділу нейрохімії, д-р біол. наук, проф.

ORCID: 0000-0002-6533-1420

E-mail: tborisov@biochem.kiev.ua

Інститут біохімії ім. О. В. Палладіна Національної академії наук України
вул. Леонтовича 9, Київ, Україна, 01054

РОЗРОБЛЕННЯ ПІДХОДІВ НЕЙРОПРОТЕКЦІЇ ПРИ ДОВГОТРИВАЛИХ КОСМІЧНИХ МІСІЯХ

Мета роботи — розробка стратегії та методології нейропротекції при довготривалих космічних місіях, яка базується на комплексному дослідженні впливу терапевтичної гіпотермії, поєднаної з дією нейроактивних препаратів, на ключові характеристики синаптичної передачі у нервових терміналях головного мозку, що змінюються під дією планетарного пилу та в умовах зміненої гравітації. Розвиток нейротоксичності в умовах зміненої гравітації може бути зумовлений надлишковим позаклітинним глутаматом, що виникає як результат реверсного функціонування глутаматних транспортерів. За умов зміни гіпотермії від помірної до глибокої, було продемонстровано поступове зменшення транспортер-опосередкованого вивільнення L-[¹⁴C]глутамату, стимульованого деполяризацією плазматичної мембрани KCl та дисипацією протонного градієнта синаптичних везикул протонофором FCCP. Цей факт свідчить про нейропротекторний ефект, який збільшується в умовах зміни гіпотермії від помірної до глибокої. Визначено можливі ризики використання гіпотермії у космічній медицині. Гіпотермія не здатна знизити позаклітинний рівень L-[¹⁴C]глутамату та [³H]ГАМК, що збільшуються під впливом карбонвмісного планетарного пилу. Гіпотермія може призвести до подальшого зменшення швидкості накопичення нейромедіаторів при наявності карбонвмісного планетарного пилу та сприяти розвитку нейротоксичності, що є можливим ризиком для використання гіпотермії у космічній медицині. У цьому контексті важливим є вибір оптимального індивідуального температурного режиму для кожного астронавта.

Ключові слова: гіпотермія, планетарний пил, L-[¹⁴C]глутамат, [³H]γ-аміноасляна кислота, синаптосоми, нервові терміналі головного мозку.

Цитування: Пастухов А. О., Крисанова Н. В., Позднякова Н. Г., Борисов А. А., Сівко Р. В., Назарова А. Г., Калиновська Л. М., Борисова Т. О. Розроблення підходів нейропротекції при довготривалих космічних місіях. *Космічна наука і технологія*. 2022. **28**, № 6 (139). С. 52—62. <https://doi.org/10.15407/knit2022.06.052>

ВСТУП

Мікрогравітація та інші фактори суттєво впливають на функціонування центральної нервової системи (ЦНС) астронавтів під час космічного польоту [15], тому без спеціальних нейропротекторних підходів довготривалі позаземні пілотовані місії не є можливими. На сьогодні розроблення стратегії нейропротекції є найбільш актуальним завданням, виконання якого зробить успішними довготривалі пілотовані космічні місії.

У ЦНС глутамат та γ -аміномасляна кислота (ГАМК) є ключовими нейротрансмітерами збудження та гальмування відповідно, порушення транспортування яких у нервових клітинах є характерною рисою етіології та патогенезу нейрологічних та нейродегенеративних захворювань.

У дослідженнях, виконаних у межах Цільової комплексної програми НАН України з наукових космічних досліджень 2007—2011 рр., ми виявили зміни функціонування ЦНС, а саме глутаматергічної та ГАМКергічної нейропередачі, та розвиток нейротоксичності в умовах гіпергравітації [4—7]. У 2012—2016 рр. у рамках Цільової комплексної програми НАН України з наукових космічних досліджень нашу увагу було зосереджено на аналізі впливу симулянтів місячного та марсіанського пилу (JSC-1/JSC-1a Orbital Technologies Corporation, Madison, USA) та виявлено розвиток нейротоксичності внаслідок дії карбонвмісного аналогу марсіанського пилу [17, 35]. Тому дані дослідження є логічним продовженням роботи наукового колективу та базуються на результатах попередніх досліджень. Нами був визначений параметр синаптичної передачі у мозку, якій є найбільш чутливим до дії зміненої гравітації, а саме показано суттєве збільшення патологічного транспортер-опосередкованого вивільнення глутамату з нервових закінчень головного мозку [5, 19]. Також були визначені характеристики синаптичної передачі у мозку, які змінюються під впливом карбонвмісного аналогу марсіанського пилу, а саме показано суттєве збільшення позаклітинного рівня глутамату та ГАМК, а також зменшення швидкості накопичення цих нейротрансмітерів у нервових терміналях [17, 35].

Мета даної роботи полягає у розробленні стратегії та методології нейропротекції для нормалізації вищезазначених показників, що змінюються під дією зміненої гравітації та карбонвмісного аналогу марсіанського пилу.

На сьогодні в аерокосмічній спільноті розглядають медичну гіпотермію не тільки як потужний нейропротекторний підхід, що запобігає розвитку нейропатологій в умовах космічної радіації, але і як засіб заощадження місця та маси космічного корабля [13, 24]. Помірна та глибока гіпотермія сьогодні успішно використовується для попередження ускладнень ішемічного інсульту та під час кардіохірургічних операцій зі зменшенням церебрального кровотоку. Терапевтична гіпотермія давно відома як неспецифічний та потужний нейропротектор. На тваринних моделях було показано, що гіпотермія вдвічі зменшує розмір ділянки ураження церебральним інсультом, і цей факт став основою для подальших клінічних випробувань терапевтичної гіпотермії у пацієнтів з ішемічним інсультом [23]. Клінічні застосування терапевтичної гіпотермії продемонстрували зменшення смертності у перший тиждень після інсульту та відновлення неврологічних функцій, а також зменшення ушкоджень мозку, які виявляються комп'ютерною томографією [16]. Обґрунтовані стандартні параметри терапевтичної гіпотермії на сьогодні відсутні. Залишається нез'ясованою низка питань щодо застосування терапевтичної гіпотермії, найбільш важливим з яких є обґрунтування оптимальних температурних режимів.

Таким чином, виявлення процесів, особливо чутливих до змін температур, та вивчення механізмів нейропротекторної дії низьких температур сприятиме широкому застосуванню цього підходу у космічній медицині та є надзвичайно актуальним питанням.

Базуючись на власних попередніх даних, ми розробляли нейропротекторний підхід для попередження розвитку нейротоксичності, викликаной впливом гіпергравітації та дією карбонвмісного аналогу марсіанського пилу. Нами було використано терапевтичну гіпотермію, поєднану з дією нейроактивного препарату. Така стра-

тегія нейропротекції для попередження розвитку ексайтотоксичності базується на комбінації таргетних та неспецифічних підходів модуляції транспорту нейромедіаторів у нервових терміналях головного мозку.

У рамках роботи було проведено:

1) аналіз впливу помірної (27 °С) та глибокої (17 °С) терапевтичної гіпотермії як потенційного нейропротектора при космічних місіях на процеси, що лежать в основі синаптичної передачі у нервових терміналях головного мозку та змінюються за дії зміненої гравітації та впливу карбонвмісного аналога марсіанського ґрунту;

2) визначення ефектів нейроактивного препарату на процеси глутаматергічної та ГАМКергічної нейропередачі з метою отримання комбінованого нейропротекторного ефекту разом з гіпотермією;

3) оцінку можливих ризиків використання гіпотермії у космічній медицині.

МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Матеріали. В роботі були використані такі матеріали та реактиви: NERES, (N-2-hydroxyethyl-piperazine-n-2-ethanesulfonic acid), «Fluka» (Швейцарія); EDTA, «Calbiochem» (США); фіколл-400, додецилсульфат натрію, амінооксидова кислота; скловолоконні фільтри Whatman GF/C «Sigma» (США); L-[¹⁴C]глутамат, сцинтиляційні рідини ACS та OSC, «Amersham», (Велика Британія); [³H]ГАМК, «Perkin Elmer» (США).

Етичні норми. Всі експерименти були виконані відповідно до «Правил проведення робіт з використанням експериментальних тварин», затверджених Комісією з догляду, утримання й використання експериментальних тварин Інституту біохімії ім. О. В. Палладіна НАН України (Протокол № 1 від 19.09.2018). Дослідження проводили на білих щурах-самцях лінії Wistar. Щурів утримували на стандартному раціоні віварію.

Виділення синапсом з головного мозку щурів. Синапсоми виділяли за методом Котмана [12] із незначними модифікаціями. Концентрацію протеїну визначали за методом Ларсона [21].

Визначення накопичення L-[¹⁴C]глутамату синапсомами. Накопичення L-[¹⁴C]глутамату

синапсомами визначали так: зразки суспензії з концентрацією протеїну 250 мкг/мл преінкубували 10 хв, при 37 °С, потім інкубували 5 хв. Реакцію ініціювали додаванням суміші L-глутамату та L-[¹⁴C]глутамату (0.1 мкКі/мл 251 мКі/ммоль) та інкубували при 37 °С. Аліквоти відбирали через 1 хв і швидко осаджували у мікроцентрифузі «Eppendorf» (20 с при 10 000 g). Накопичення визначали в аліквотах надосаду (100 мкл) та солюбілізованого в SDS осаду за допомогою сцинтиляційного лічильника Delta 300 («Tracor Analytic», США) у сцинтиляційній рідині ACS (aqueous counting scintillate — сцинтиляційна рідина для водних зразків) (1.5 мл) [37].

Визначення вивільнення L-[¹⁴C]глутамату з синапсомом. Суспензія синапсомом розводилася стандартним сольовим розчином до концентрації 1 мг протеїну/мл, і після 10 хв преінкубації при 37 °С навантажувалася L-[¹⁴C]глутаматом (500 нМ, 238 мКі/ммоль) в кальцієвому стандартному сольовому розчині упродовж 10 хв. Після цього суспензія синапсомом відмивалася 10 об'ємами стандартного сольового розчину, розводилася до концентрації 1 мг протеїну/мл і відразу використовувалася для визначення вивільнення L-[¹⁴C]глутамату з синапсомом [18]. Аліквоти (120 мкл; 25...30 мкг навантажених L-[¹⁴C]глутаматом синапсомом), преінкубували 10 хв при температурі 37 °С, потім інкубували 5 хв. Нестимульоване вивільнення L-[¹⁴C]глутамату з синапсомом у безкальцієвому середовищі визначали за 6 хв. Суспензію синапсомом швидко осаджували в мікроцентрифузі, та центрифугували при 10000 g протягом 20 с. Аліквоти надосаду (90 мкл) та солюбілізованого додецилсульфатом натрію осаду (90 мкл) змішували з сцинтиляційною рідиною ACS (1.5 мл) та визначали радіоактивність за допомогою сцинтиляційного лічильника Delta 300 («Tracor Analytic», США). Загальний вміст радіоактивності визначали як суму радіоактивності у аліквоті надосаду та у аліквоті солюбілізованого осаду.

Визначення накопичення [³H]ГАМК синапсомами. В досліді з акумуляції [³H]ГАМК синапсомами стандартний сольовий розчин містив 100 мкМ амінооксидової кислоти, інгібітора ГАМК-трансамінази, для запобігання утворення

метаболітів ГАМК. Концентрація протеїну синапсом у пробі дорівнювала 200 мкг/мл, об'єм проби дорівнював 0.6 мл. Синапсоми преінкубували 5 хв при 37 °С, після чого ініціювали процес акумуляції внесенням суміші ГАМК (1 мкМ ГАМК та 50 нМ — 0.2 мкКі/мл [³H]ГАМК). Через 1 хв аліквоти (0.5 мл) фільтрували через GF/C-фільтри. Фільтри двічі промивали охолодженим стандартним сольовим розчином, висушували та вимірювали рівень радіоактивності у сцинтиляційній рідині OCS в лічильнику Delta 300 («Tracor Analytic», США) [9].

Визначення вивільнення [³H]ГАМК з синапсом.

Синапсоми (2 мг протеїну/мл) в оксигенованому стандартному сольовому розчині, який містив 10 мкМ амінооксиоцтової кислоти, інкубували 5 хв при 37 °С при наявності $5 \cdot 10^{-7}$ М (0.1 Кі/мл) [³H]ГАМК. Після охолодження на льоду, суспензію втричі розводили охолодженим сольовим розчином і центрифугували 5 хв при 4000 g. Осад суспендували при температурі 4 °С і концентрації протеїну 1 мг/мл в сольовому розчині, який містив 10 мкМ амінооксиоцтової кислоти. Синапсоми, що акумулювали [³H]ГАМК (1 мг протеїну/мл), негайно використовували для вивчення процесів вивільнення ГАМК. Синапсоми (120 мкл суспензії) преінкубували 10 хв при температурі 37 °С, потім інкубували 5 хв. Зразки інкубували ще 5 хв, після чого центрифугували у мікроцентрифугі Eppendorf (10000 g, 20 с). Рівень радіоактивності вивільненої [³H]ГАМК в аліквотах супернатанту (90 мкл) вимірювали в лічильнику Delta 300 («Tracor Analytic», США) з використанням сцинтиляційної рідини ACS (1 мл на 1 аліквоту). Вміст міченої ГАМК у супернатантах був виражений у відсотках від загального вмісту [³H]ГАМК в синапсомах.

Статистична обробка результатів. Результати представлені як середнє \pm SEM в *n* незалежних експериментах. Різницю між двома групами порівнювали за допомогою однофакторного дисперсійного аналізу (One-way ANOVA). Різниця вважалася значущою при $p < 0.05$. Статистична обробка даних, побудова графіків і розрахунки функцій проводили з використанням програми Excel.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Принциповий підхід для швидкого аналізу токсичності частинок планетарного пилу за умов довготривалих космічних місій. Пілотовані позаземні місії та плани освоєння нових планет вимагають оцінки ризику токсичності планетарного пилу. Підготовка перспективних місій (особливо найближчі плани створення навколomisячної станції) вимагають якнайшвидшого розроблення методології експрес-аналізу токсичних компонентів навколишнього середовища.

Літературні дані свідчать, що частинки місячного пилу сорбуються на скафандрах і потрапляють всередину космічних кораблів [14]. В результаті прямого контакту з частинками місячного пилу протягом декількох місій Apollo спостерігалось подразнення очей, дихальних шляхів та шкіри. Формування, склад і фізичні властивості місячного, марсіанського та іншого планетарного пилу та його вплив на здоров'я людини недостатньо охарактеризовані [20, 22, 36]. В організмі ссавців, ультрадисперсні частинки можуть тривалий час зберігатись в носовій порожнині, бронхах та альвеолах, і окрім перерозподілу між різними органами, транспортуються вздовж сенсорних аксонів нюхового нерва до центральної нервової системи [25, 26]. *In vitro* поглинання ультрадисперсних частинок у клітинах відбувається шляхом дифузії або адгезії. Ці частинки проникають крізь клітинні мембрани без фагоцитозу в легенях і в культурі клітин. У клітинах вони знаходяться у незв'язаній з мембраною формі і можуть безпосередньо взаємодіяти з внутрішньоклітинними білками, органелами і ДНК, що може значно підвищити їхній токсичний потенціал.

У наших роботах було показано, що зміни позаклітинного рівня нейромедіаторів, швидкості накопичення нейромедіаторів та мембранного потенціалу нервових терміналей є ключовими характеристиками, що визначають нейротоксичність частинок планетарного пилу. З використанням електрофізіологічного обладнання пласка бішарова ліпідна мембрана запропоновано та доведено принципову можливість швидкої оцінки токсичності частинок планетарного пилу без використання біологічних об'єктів, таке обладнання потрібно адаптувати для використання

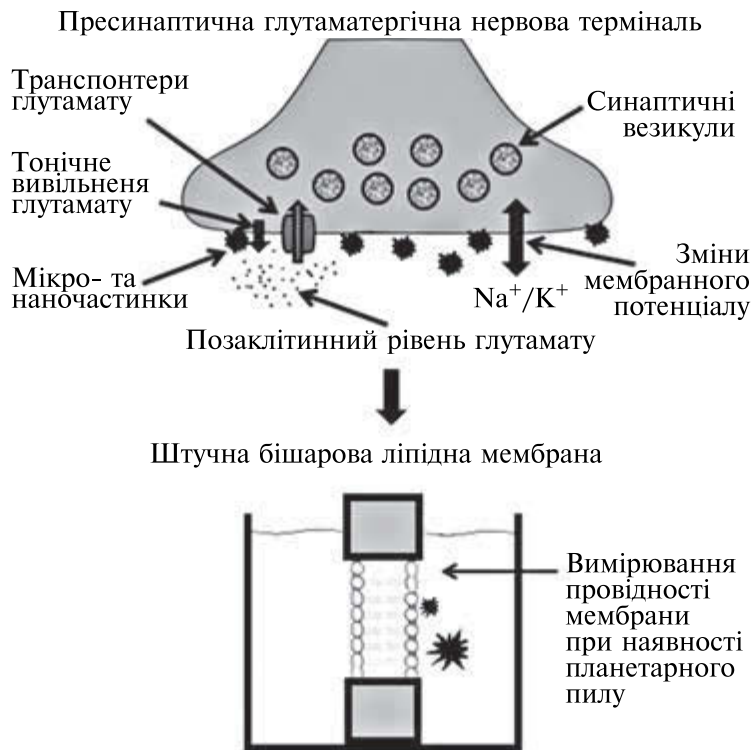


Рис. 1. Запропонований підхід щодо принципової можливості аналізу токсичності частинок планетарного пилу в умовах довготривалих космічних місій

в умовах космічних місій (рис. 1). Цей запропонований нами підхід пройшов рецензування закордонними експертами та був опублікований [2].

Вплив гіпотермії на ключові характеристики синаптичної передачі у нервових терміналях головного мозку, що змінюються за дії карбонвмісного марсіанського пилу та зміненої гравітації. Ми дослідили вплив помірної та глибокої гіпотермії на транспортер-залежне накопичення L-[¹⁴C]глутамату та [³H]ГАМК у нервових терміналях головного мозку щурів. Показано, що як помірною, так і глибока гіпотермія призводять до суттєвого зменшення початкової швидкості накопичення та акумуляції L-[¹⁴C]глутамату нервовими терміналями (табл. 1).

Зміни динаміки накопичення синаптосомами L-[¹⁴C]глутамату доводять, що помірною та глибокою гіпотермією суттєво гальмують зазначений процес. Також було досліджено вплив помірної та глибокої гіпотермії на транспортер-залежне накопичення та позаклітинний рівень [³H]ГАМК в

нервових терміналях головного мозку щурів. Показано, що як і в експериментах з L-[¹⁴C]глутаматом, початкова швидкість накопичення синаптосомами [³H]ГАМК зменшувалась на 15 % при зменшенні температури до 27 °C та ще на 15 % при подальшому зниженні температури до 17 °C.

Карбонвмісний аналог марсіанського пилу (КЧ-МП — суміш карбонних наночастинок, синтезованих з β-аланіну та аналогу марсіанського пилу JSC-1a) викликав зменшення на 37 % транспортер-залежного накопичення L-[¹⁴C]глутамату та на 84 % [³H]ГАМК в нервових терміналях головного мозку щурів (табл. 2).

Таким чином, гіпотермія може призвести до подальшого зменшення швидкості накопичення нейромедіаторів при наявності карбонвмісного планетарного пилу та сприяти розвитку нейротоксичності, що є можливим ризиком використання гіпотермії у космічній медицині.

Певна концентрація позаклітинного глутамату та ГАМК в нервових терміналях є ключовою

характеристикою, що відображає функціональний стан нервових терміналей. Цей рівень підтримується протилежно спрямованими процесами накопичення та вивільнення нейромедіаторів. Збільшення рівня позаклітинного глутамату, яке відбувається за умов гіпоксії, ішемії, інсульту, при травмах мозку, гіпоглікемії, а також при наявності карбонвмісного планетарного пилу, викликає нейротоксичність і загибель нейронів. Позаклітинний рівень L-[¹⁴C]глутамату змінювався у незначній мірі в умовах зменшення температури. Так, у контролі (37 °C) позаклітинний рівень L-[¹⁴C]глутамату становив 18.66 ± 1.87 % від загальної акумульованої синапсосомами радіоактивної мітки, при температурі 27 °C він дорівнював 14.13 ± 1.93 %, а при температурі 17 °C ($n = 15$) — 16.07 ± 1.54 %.

Карбонвмісний аналог марсіанського пилу (КЧ-МП) викликав значне збільшення позаклітинного рівня L-[¹⁴C]глутамату та [³H]ГАМК в нервових терміналях головного мозку щурів (табл. 3).

Отримані результати дозволяють зробити висновок, що у порівнянні з суттєвим інгібуванням накопичення та тонічного вивільнення L-[¹⁴C]глутамату позаклітинний рівень L-[¹⁴C]глутамату змінювався незначно в умовах помірної та глибокої гіпотермії. Єдине можливе пояснення цього факту полягає в тому, що тонічне вивільнення зменшувалося з тією ж ефективністю, як і накопичення L-[¹⁴C]глутамату в синапсосомах. При дослідженні позаклітинного рівня [³H]ГАМК також було продемонстровано, що цей рівень не є чутливим до дії гіпотермії.

Таблиця 1. Початкова швидкість транспортер-залежного накопичення та акумуляція L-[¹⁴C]глутамату за 10 хв у нервових терміналях під дією помірної та глибокої гіпотермії (середнє значення \pm SEM)

	Початкова швидкість накопичення L-[¹⁴ C]глутамату, нмоль/хв/мг протеїну	Накопичення L-[¹⁴ C]глутамату за 10 хв, нмоль/ мг протеїну
Контроль (37 °C)	2.63 ± 0.08	9.83 ± 0.35
Помірна гіпотермія (27 °C)	$2.09 \pm 0.20^*$	$7.42 \pm 0.27^*$
Глибока гіпотермія (17 °C)	$1.48 \pm 0.12^*$	$5.75 \pm 0.52^*$

Примітка: * — $p < 0.05$, $n = 6$

Таблиця 2. Транспортер-залежне накопичення L-[¹⁴C]глутамату та [³H]ГАМК у нервових терміналях за дії карбонвмісного аналогу марсіанського пилу (КЧ-МП). Дані представлені як середнє значення \pm SEM

	Накопичення L-[¹⁴ C]глутамату за 10 хв, нмоль/ мг протеїну	Накопичення [³ H]ГАМК за 5 хв, пмоль/мг протеїну
Контроль	10.12 ± 0.50	460.55 ± 23.25
КЧ-МП	$6.36 \pm 0.40^*$	$74.94 \pm 10.02^{**}$

Примітка: * — $p < 0.05$, ** — $p < 0.001$, $n = 6$.

Таблиця 3. Позаклітинний рівень L-[¹⁴C]глутамату та [³H]ГАМК у нервових терміналях під дією карбонвмісного аналогу марсіанського пилу (КЧ-МП)

	Позаклітинний рівень L-[¹⁴ C]глутамату у нервових терміналях, % від загальної акумульованої синапсосомами радіоактивної мітки	Позаклітинний рівень [³ H]ГАМК у нервових терміналях, % від загальної акумульованої синапсосомами радіоактивної мітки
Контроль	19.18 ± 0.56	18.67 ± 0.61
КЧ-МП	$64.75 \pm 1.15^{**}$	$34.01 \pm 3.20^*$

Примітка: * — $p < 0.01$, ** — $p < 0.001$, $n = 6$

Таким чином, гіпотермія, ймовірно, не здатна знизити позаклітинний рівень L-[¹⁴C]глутамату та [³H]ГАМК, що збільшуються під впливом карбонвмісного планетарного пилу.

У наступній серії експериментів проаналізовано вплив гіпотермії на патологічні процеси, що розвиваються під час впливу зміненої гравітації на нервову систему та визначено можливі ризики використання гіпотермії у космічній медицині.

Транспортер-опосередковане вивільнення глутамату з нервових терміналей головного мозку підвищувалося на 30 % в умовах зміненої гравітації. Головним механізмом, який пізніше може призвести до збільшення концентрації позаклітинного глутамату в умовах зміненої гравітації та зробити астронавта більш чутливим до умов гіпоксії та ішемії, є підвищене патологічне транспортер-опосередковане вивільнення глутамату з нервових терміналей головного мозку (табл. 4).

Деполаризація плазматичної мембрани нервових терміналей КСІ у безкальцієвому середовищі зумовлює реверсну роботу транспортерів глутамату та транспортер-опосередковане вивільнення глутамату з цитозолу. Зменшення транспортер-опосередкованого вивільнення є однією з основних стратегій нейропротекції. В цьому сенсі терапевтична гіпотермія — сильний неспецифічний нейропротектант, який може моделювати активність глутаматних транспортерів та значно зменшувати патологічне транспортер-опосередковане вивільнення глутамату з нервових терміналей. Доведено, що вивільнення L-[¹⁴C]глутамату, стимульоване 30 мМ КСІ у безкальцієвому середовищі, зменшувалося в

умовах помірної та глибокої гіпотермії. Вивільнення L-[¹⁴C]глутамату в контролі (37 °С) становило 12.0 ± 1.0 % від загальної кількості акумульованої синапсосомами радіоактивної мітки, 10.0 ± 0.5 % — при температурі 27 °С та 6.0 ± 0.5 % при температурі 17 °С (*p* < 0.05, *n* = 6).

Таким чином, вивільнення L-[¹⁴C]глутамату з цитозольного пулу синапсосом поступово зменшувалося в умовах помірної та глибокої гіпотермії.

У серії експериментів ми проаналізували вплив помірної та глибокої гіпотермії на транспортер-опосередковане вивільнення L-[¹⁴C]глутамату з синапсосом при застосуванні протонифору FCCP. FCCP-стимульоване вивільнення L-[¹⁴C]глутамату в контролі (37 °С) складало 15.50 ± 1.0 % від загальної кількості акумульованої синапсосомами радіоактивної мітки, 9.50 ± 1.0 % при 27 °С та 6.30 ± 0.50 % при 17 °С (*p* < 0.05, *n* = 6).

Розвиток нейротоксичності під дією зміненої гравітації зумовлений надлишковим позаклітинним глутаматом, що виникає, головним чином, як результат реверсного функціонування глутаматних транспортерів. У проведених дослідах в умовах зміни гіпотермії від помірної до глибокої, було продемонстровано поступове зменшення транспортер-опосередкованого вивільнення L-[¹⁴C]глутамату, стимульованого деполаризацією плазматичної мембрани 30 мМ КСІ та дисипацією протонного градієнта синаптичних везикул протонифором FCCP. Цей факт свідчить про поступовий нейропротекторний ефект, який збільшується при зміні гіпотермії від помірної до глибокої. Нейропротекторний ефект гіпотермії можемо спостерігати, коли нервові клітини все ще в змозі вивільняти глутамат за рахунок реверсу транспортерів. У значно пошкоджених нервових клітинах вищезгаданий механізм не працює через зменшення градієнта глутамату (глутамат всередині/глутамат ззовні) через плазматичну мембрану. У цьому контексті важливим є вибір оптимального індивідуального температурного режиму для кожного астронавта.

Беручи до уваги вищезазначені факти, ми вважаємо, що стратегія успішної терапевтичної гіпотермії при довготривалих космічних місіях, з

Таблиця 4. Транспортер-опосередковане вивільнення L-[¹⁴C]глутамату з нервових терміналей в умовах зміненої гравітації

	Транспортер-опосередковане вивільнення L-[¹⁴ C]глутамату з нервових терміналей, % від загальної акумульованої синапсосомами радіоактивної мітки
Контроль	27.0 ± 2.2
Гіпергравітація	35.0 ± 2.3*

Примітка: * — *p* < 0.05, *n* = 10.

одного боку, полягає у зменшенні її можливого шкідливого впливу на нервові клітини, вражені дією зміненої гравітації, шляхом стабілізації концентрації позаклітинного глутамату через компоненти, що призводять до рівноваги процеси вивільнення/накопичення, а з іншого — у посиленні її прямого нейропротекторного ефекту за рахунок значного зменшення реверсу глутаматних транспортерів. Ця стратегія може бути підсилена шляхом комбінування та поєднання неспецифічних ефектів гіпотермії з дією специфічних нейропротекторних сполук.

Наступні дослідження стосувалися попередження розвитку ексайтотоксичності, яке базується на комбінації таргетних та неспецифічних підходів модуляції транспорту нейромедіаторів у нервових терміналях головного мозку, та проведення скринінг-ефектів нейроактивних сполук на процес глутаматергічної та ГАМКергічної нейропередачі з метою отримання синергічного нейропротекторного ефекту разом з гіпотермією. У цьому аспекті нами була показана можливість комбінованого застосування гіпотермії та антиепілептичного препарату леветирацетаму. Була з'ясована можливість впливу леветирацетаму на NMDA-стимульоване вивільнення L-[¹⁴C]глутамату з нервових терміналей за умов гіпотермії. Леветирацетам у концентрації 100 мкМ індукував збільшення вивільнення L-[¹⁴C]глутамату з нервових терміналей, викликаних активацією пресинаптичних NMDA-рецепторів. Цей ефект зберігався і в умовах гіпотермії. Рівень NMDA-стимульованого вивільнення L-[¹⁴C]глутамату з нервових терміналей при 27 °C становив $3.75 \pm 0.22 \%$ у контролі та $5.1 \pm 0.5 \%$ від загального вмісту міченого глутамату на 15-й хвилині після попередньої інкубації з 100 мкМ леветирацетамом ($p < 0.05$, $n = 6$). При 17 °C на 6-й хвилині у контролі він дорівнював $3.09 \pm 0.23 \%$ від загального вмісту міченого глутамату та $4.32 \pm 0.51 \%$ від загального вмісту міченого глутамату на 15-й хвилині після попередньої інкубації з 100 мкМ леветирацетамом ($p < 0.05$, $n = 6$). Водночас леветирацетам у концентрації 100 мкМ мав незначний вплив на AMPA- та кайнат-стимульоване вивільнення L-[¹⁴C]глутамату за нормальних умов та за умов гіпотермії.

Таким чином, ми довели, що леветирацетам змінює відповідь при активації пресинаптичних NMDA-рецепторів. Цей препарат у концентрації 100 мкМ збільшує NMDA-стимульоване вивільнення L-[¹⁴C]глутамату з нервових терміналей та істотно не змінює AMPA- та кайнат-стимульоване вивільнення.

Особливо важливим фактом, доведеним нашими експериментами, є можливість коригування (пом'якшення) леветирацетамом зменшення NMDA-індукованого вивільнення L-[¹⁴C]глутамату в умовах гіпотермії. Корекція відповіді NMDA-рецепторів може зменшити побічні ефекти терапевтичної гіпотермії за умов довготривалих космічних місій та може стати у нагоді для забезпечення належного функціонування NMDA-рецепторів при відновленні після гіпотермії. Запропонований підхід є актуальним у випадках, коли гіпотермія застосовується не для запобігання гострої ексайтотоксичності глутамату. Це відбувається тому, що підвищення NMDA-відповіді за цих патологій може ускладнити ексайтотоксичні наслідки. Динаміка зменшення в умовах гіпотермії синаптосомального вивільнення L-[¹⁴C]глутамату під впливом агоністів рецепторів, показана у наших експериментах, може бути корисною для обґрунтування оптимальних режимів терапевтичної гіпотермії за умов довготривалих космічних місій. Леветирацетам значно пом'якшує стимульоване гіпотермією зменшення позаклітинного глутамату через NMDA-рецептори на пресинаптичному рівні, і отже, комбіноване застосування гіпотермії та леветирацетаму в умовах довготривалих космічних місій коригує та наближає до норми NMDA-стимульоване вивільнення L-[¹⁴C]глутамату з нервових терміналей. Використання специфічних сполук, модуляторів транспорту нейромедіаторів, спільно з потужним неспецифічним нейропротектантом, таким як гіпотермія, є, на наш погляд, найбільш ефективним підходом для попередження розвитку ексайтотоксичності в умовах довготривалого космічного польоту.

У цілому отримані експериментальні дані імплементовані у світовий науково-інформаційний простір [1, 2, 31–34, 3, 8, 10, 11, 27–30]. Розроблені нейропротекторні підходи будуть ко-

рисними для подальшої практичної реалізації у межах міжнародних проєктів довгострокових космічних місій. Програми НАСА, такі як «Проект дослідження людини», зосереджуються на використанні трансляційних методів та розумінні основних механізмів, що лежать в основі нейротоксичного потенціалу навколишнього середовища, і є необхідним першим кроком у захисті здоров'я екіпажу та прогнозування ризиків у процесі дослідження космосу. Науковий

напрямок щодо дослідження нейротоксичності планетарного пилу зазначений офіційному листі Європейського Космічного Агентства (ЄКА) до Державного космічного агентства України (серпень 2022 р.) як пріоритетний напрям для спільних досліджень.

Робота виконана за підтримки Цільової комплексної програми НАН України з наукових космічних досліджень на 2017—2022 рр.

REFERENCES

1. Borisova T. (2018). Nervous system injury in response to contact with environmental, engineered and planetary micro- and nano-sized particles. *Front. Physiol.*, **9**, 728. DOI: 10.3389/fphys.2018.00728.
2. Borisova T. (2019). Express assessment of neurotoxicity of particles of planetary and interstellar dust. *npj Microgravity*, **5**, № 1, 2. DOI: 10.1038/s41526-019-0062-7.
3. Borisova T. (2022). Environmental nanoparticles: Focus on multipollutant strategy for environmental quality and health risk estimations. *Biomed. Nanomater.*, 305—321. DOI: 10.1007/978-3-030-76235-3_11.
4. Borisova T. A., Himmelreich N. H. (2005). Centrifuge-induced hypergravity: [³H]GABA and L-[¹⁴C]glutamate uptake, exocytosis and efflux mediated by high-affinity, sodium-dependent transporters. *Adv. Space Res.*, **36**, № 7, 1340—1345. DOI: 10.1016/j.asr.2005.10.007.
5. Borisova T. A., Krisanova N. V. (2008). Presynaptic transporter-mediated release of glutamate evoked by the protonophore FCCP increases under altered gravity conditions. *Adv. Space Res.*, **42**, № 12, 1971—1979. DOI: 10.1016/j.asr.2008.04.012.
6. Borisova T., Krisanova N., Himmelreich N. (2004). Exposure of animals to artificial gravity conditions leads to the alteration of the glutamate release from rat cerebral hemispheres nerve terminals. *Adv. Space Res.*, **33**, № 8, 1362—1367. DOI: 10.1016/j.asr.2003.09.039.
7. Borisova T., Krisanova N., Sivko R., et al. (2010). Cholesterol depletion attenuates tonic release but increases the ambient level of glutamate in rat brain synaptosomes. *Neurochem. Int.*, **56**, № 3, 466—478. DOI: 10.1016/j.neuint.2009.12.006.
8. Borisova T., Pozdnyakova N., Dudarenko M., et al. (2021). GABAA receptor agonist cinazepam and its active metabolite 3-hydroxyphenazepam act differently at the presynaptic site. *Eur. Neuropharmacol.*, **45**, 39—51. DOI: 10.1016/j.euroneuro.2021.03.013.
9. Borisova T., Pozdnyakova N., Krisanova N., et al. (2021). Unique features of brain metastases-targeted AGuIX nanoparticles vs their constituents: A focus on glutamate-/GABA-ergic neurotransmission in cortex nerve terminals. *Food Chem. Toxicol.*, **149**, 112004. DOI: 10.1016/j.fct.2021.112004.
10. Borysov A., Pozdnyakova N., Pastukhov A., et al. (2018). Comparative analysis of neurotoxic potential of synthesized, native, and physiological nanoparticles. *Neuromethods*, **135**, 203—227. DOI: 10.1007/978-1-4939-7584-6_13/COVER.
11. Borysov A., Tarasenko A., Krisanova N., et al. (2020). Plastic smoke aerosol: Nano-sized particle distribution, absorption/fluorescent properties, dysregulation of oxidative processes and synaptic transmission in rat brain nerve terminals. *Environ. Pollut.*, **263**, 114502. DOI: 10.1016/j.envpol.2020.114502.
12. Cotman C. W. (1974). Isolation of synaptosomal and synaptic plasma membrane fractions. *Methods Enzymol.*, **31**, 445—452.
13. Fukunaga H. (2020). The effect of low temperatures on environmental radiation damage in living systems: Does hypothermia show promise for space travel? *Int. J. Mol. Sci.*, **21**, № 17, 6349. DOI: 10.3390/ijms21176349.
14. Gaier J. R. (2005). *The effects of lunar dust on EVA systems during the Apollo missions*. Cleveland, Ohio: NASA Glenn Research Center, NASA/TM-2005-213610.
15. Hupfeld K. E., McGregor H. R., Reuter-Lorenz P. A., et al. (2021). Microgravity effects on the human brain and behavior: Dysfunction and adaptive plasticity. *Neurosci. Biobehav. Rev.*, **122**, 176—189. DOI: 10.1016/J.NEUBIOREV.2020.11.017.
16. Kammersgaard L. P., Jørgensen H. S., Rungby J. A., et al. (2002). Admission body temperature predicts long-term mortality after acute stroke: the Copenhagen Stroke Study. *Stroke*, **33**, № 7, 1759—62.
17. Krisanova N., Kasatkina L., Sivko R., et al. (2013). Neurotoxic potential of Lunar and Martian dust: Influence on Em, proton gradient, active transport, and binding of glutamate in rat brain nerve terminals. *Astrobiology*, **13**, № 8, 679—692. DOI: 10.1089/ast.2012.0950.

18. Krisanova N., Pozdnyakova N., Pastukhov A., et al. (2019). Vitamin D3 deficiency in puberty rats causes presynaptic malfunctioning through alterations in exocytotic release and uptake of glutamate/GABA and expression of EAAC-1/GAT-3 transporters. *Food Chem. Toxicol.*, **123**, DOI: 10.1016/j.fct.2018.10.054.
19. Krisanova N. V., Triakash I. O., Borisova T. A. (2009). Synaptopathy under conditions of altered gravity: changes in synaptic vesicle fusion and glutamate release. *Neurochem. Int.*, **55**, № 8, 724–731. DOI: 10.1016/J.NEUINT.2009.07.003.
20. Lam C. W., Scully R. R., Zhang Y., et al. (2013). Toxicity of lunar dust assessed in inhalation-exposed rats. *Inhal. Toxicol.*, **25**, № 12, 661–678. DOI: 10.3109/08958378.2013.833660.
21. Larson E., Howlett B., Jagendorf A. (1986). Artificial reductant enhancement of the Lowry method for protein determination. *Anal. Biochem.*, **155**, № 2, 243–248. DOI: 10.1016/0003-2697(86)90432-X.
22. Latch J. N., Hamilton R. F., Holian A., et al. (2008). Toxicity of lunar and martian dust simulants to alveolar macrophages isolated from human volunteers. *Inhal. Toxicol.*, **20**, № 2, 157–165. DOI: 10.1080/08958370701821219.
23. Mrozek S., Vardon F., Geeraerts T. (2012). Brain temperature: Physiology and pathophysiology after brain injury. *Anesthesiol. Res. Pract.*, **2012**, 989487. DOI: 10.1155/2012/989487.
24. Nordeen C. A., Martin S. L. (2019). Engineering Human Stasis for Long-Duration Spaceflight. *Physiology*, **34**, № 2, 101–111. DOI: 10.1152/physiol.00046.2018.
25. Oberdörster G., Elder A., Rinderknecht A. (2009). Nanoparticles and the brain: cause for concern? *J. Nanosci. Nanotechnol.*, **9**, № 8, 4996–5007. DOI: 10.1166/JNN.2009.GR02.
26. Oberdörster G., Oberdörster E., Oberdörster J. (2005). Nanotoxicology: an emerging discipline evolving from studies of ultrafine particles. *Environ. Health Perspect.*, **113**, № 7, 823–39. DOI: 10.1289/ehp.7339.
27. Paliienko K., Pastukhov A., Babič M., et al. (2020). Transient coating of γ -Fe₂O₃ nanoparticles with glutamate for its delivery to and removal from brain nerve terminals. *Beilstein J. Nanotechnol.*, **11**, № 1, 1381–1393. DOI: 10.3762/bjnano.11.122.
28. Pastukhov A., Borisova T. (2018). Levetiracetam-mediated improvement of decreased NMDA-induced glutamate release from nerve terminals during hypothermia. *Brain Res.*, **1699**, DOI: 10.1016/j.brainres.2018.06.032.
29. Pastukhov A., Borisova T. (2018). Combined application of glutamate transporter inhibitors and hypothermia discriminates principal constituent processes involved in glutamate homo- and heteroexchange in brain nerve terminals. *Ther. Hypothermia Temp. Manag.*, **8**, № 3, 143–149. DOI: 10.1089/ther.2017.0047.
30. Pastukhov A., Krisanova N., Pyshev K., et al. (2020). Dual benefit of combined neuroprotection: Cholesterol depletion restores membrane microviscosity but not lipid order and enhances neuroprotective action of hypothermia in rat cortex nerve terminals. *Biochim. Biophys. Acta - Biomembr.*, **1862**, № 9, 183362. DOI: 10.1016/J.BBAMEM.2020.183362.
31. Patsula V., Borisova T., Kostiv U., et al. (2019). Effect of Fe₃O₄@SiO₂ Nanoparticle Diameter on Glutamate Transport in Brain Nerve Terminals. *Nanosci. Nanotechnol. Lett.*, **11**, № 1, 61–69. DOI: 10.1166/NNL.2019.2853.
32. Pozdnyakova N., Borisova T. (2018). Evaluation of the neurotoxicity of the inorganic analogue of Martian dust enriched with the new carbon nanoparticles. *Sp. Res. Ukr. 2016–2018*, 62–65.
33. Pozdnyakova N., Dudarenko M., Borisova T. (2019). Age-Dependency of Levetiracetam Effects on Exocytotic GABA Release from Nerve Terminals in the Hippocampus and Cortex in Norm and After Perinatal Hypoxia. *Cell. Mol. Neurobiol.*, **39**, № 5, 701–714. DOI: 10.1007/S10571-019-00676-6.
34. Pozdnyakova N. G., Pastukhov A. O., Dudarenko M. V., et al. (2018). Enrichment of the inorganic analogue of martian dust with the novel carbon nanoparticles obtained during combustion of carbohydrates and assesment of its neurotoxicity. *Sp. Sci. Technol.*, **24**, № 2, 60–71. DOI: 10.15407/knit2018.02.060.
35. Pozdnyakova N., Pastukhov A., Dudarenko M., et al. (2017). Enrichment of inorganic Martian dust simulant with Carbon component can provoke neurotoxicity. *Microgravity Sci. Technol.*, **29**, № 1-2, 133–144. DOI: 10.1007/s12217-016-9533-6.
36. Scully R. R., Lam C. W., James J. T. (2013). Estimating safe human exposure levels for lunar dust using benchmark dose modeling of data from inhalation studies in rats. *Inhal. Toxicol.*, **25**, № 14, 785–793. DOI: 10.3109/08958378.2013.849315.
37. Tarasenko A. S., Sivko R. V., Krisanova N. V., et al. (2010). Cholesterol depletion from the plasma membrane impairs proton and glutamate storage in synaptic vesicles of nerve terminals. *J. Mol. Neurosci.*, **41**, № 3, 358–367. DOI: 10.1007/S12031-010-9351-Z.

Стаття надійшла до редакції 26.08.2022

Після доопрацювання 26.08.2022

Прийнято до друку 02.09.2022

Received 26.08.2022

Revised 26.08.2022

Accepted 02.09.2022

A. O. Pastukhov, Researcher, Ph.D. in Biology

ORCID: 0000-0001-5837-6412

N. V. Krisanova, Senior Researcher, Ph.D. in Biology

N. G. Pozdnyakova, Senior Researcher, Ph.D. in Biology

ORCID: 0000-0001-9922-5389

A. A. Borysov, Leading Engineer

R. V. Sivko, Researcher, Ph.D. in Biology

A. G. Nazarova, Leading Engineer

L. M. Kalinovska, Postgraduate

ORCID: 0000-0002-3741-7040

T. O. Borisova, Prof., Dr. Sci. In Biology, Head of the Department of Neurochemistry

ORCID: 0000-0002-6533-1420

E-mail: tborisov@biochem.kiev.ua

Palladin Institute of Biochemistry of the National Academy of Sciences of Ukraine

9 Leontovicha Str., Kyiv, 01054 Ukraine

DEVELOPMENT OF NEUROPROTECTION APPROACHES FOR LONG-TERM SPACE MISSIONS

The study aimed to develop a strategy and methodology for neuroprotection during long-term space missions, which is based on a comprehensive study of the impact of therapeutic hypothermia combined with the action of neuroactive drugs on the key characteristics of synaptic transmission in brain nerve terminals, which change under the influence of planetary dust and conditions of altered gravity. Development of neurotoxicity under conditions of altered gravity may result from excess extracellular glutamate caused by the reverse functioning of glutamate transporters. Under conditions of moderate and deep hypothermia, a gradual decrease in the transporter-mediated release of L-[¹⁴C]glutamate from nerve terminals was demonstrated, which is stimulated by plasma membrane depolarization with KCl and dissipation of the proton gradient of synaptic vesicles by the protonophore FCCP. This fact indicates a neuroprotective effect, which increases when hypothermia changes from moderate to deep. The possible risks of using hypothermia in space medicine have been determined. Hypothermia is not able to reduce the extracellular level of L-[¹⁴C]glutamate and [³H]GABA, which increases under the conditions of exposure to carbon-containing planetary dust. Hypothermia can lead to a further decrease in the rate of accumulation of neurotransmitters in the presence of carbon-containing planetary dust and to contribute to the development of neurotoxicity, which is a possible risk of using hypothermia in space medicine. In this context, it is important to choose the optimal individual temperature regime for each astronaut.

Keywords: hypothermia, planetary dust, L-[¹⁴C]glutamate, [³H]GABA, synaptosomes, brain nerve terminals.

<https://doi.org/10.15407/knit2022.06.063>
УДК 349.6, 346.3

Н. Р. МАЛИШЕВА, зав. відділу, заст. дир. Міжнародного центру космічного права,
д-р юрид. наук, проф., акад. Нац. акад. прав. наук України
ORCID: 0000-0001-6630-227X
E-mail: nataliia_malysheva@ukr.net
А. М. ГУРОВА, наук. співроб., канд. юрид. наук
E-mail: a.m.hurova@gmail.com
ORCID: 0000-0003-4134-761X

Інститут держави і права імені В. М. Корецького Національної академії наук України
вул. Трьохсвятительська 4, Київ, Україна, 01601

ДОВГОСТРОКОВА СТАЛІСТЬ КОСМІЧНОЇ ДІЯЛЬНОСТІ: НОВІ ВИКЛИКИ ПЕРЕД МІЖНАРОДНИМ І НАЦІОНАЛЬНИМ КОСМІЧНИМ ПРАВОМ

Висвітлено результати дослідження правових проблем, які є актуальними для забезпечення довгострокової сталості космічної діяльності, курс на яку як дороговказний проголошено ООН. Виокремлено правовідносини, які з одного боку дозволяють поштовхнути комерційну складову космічної галузі вітчизняної економіки, а з іншого — сприяють утвердженню відповідальної сталого поведінки усіх суб'єктів космічної діяльності в загальнопланетарному масштабі. Під таким кутом зору розглянуто специфічні проблеми державно-приватного партнерства в космічній галузі, висунуто пропозиції щодо правової моделі регулювання дистанційного зондування Землі, наголошено на викликах перед міжнародним і національним правом у зв'язку з кіберзагрозами космічній діяльності, зокрема й за допомогою використання блокчейн-технології, проаналізовано міжнародно-правові проблеми регулювання видобування ресурсів космосу під кутом зору забезпечення сталості цієї діяльності, наголошено на необхідності напрацювання правових механізмів, вироблення норм та принципів відповідальної поведінки людини в космосі.

В результаті дослідження було запропоновано: 1) правові засоби лібералізації участі державних підприємств як суб'єктів, а не об'єктів відносин державно-приватного партнерства, 2) модель врегулювання відносин із забезпечення України даними ДЗЗ, зокрема шляхом публічних закупівель Центром управління і випробування космічних засобів, 3) міжнародно-правові та національно-правові механізми боротьби із кіберзагрозами космічній діяльності, 4) правові інститути, які слід розвивати для унормування діяльності із видобування космічних ресурсів, 5) правила забезпечення відповідальної космічної діяльності.

Ключові слова: довгострокова сталість космічної діяльності, державно-приватне партнерство, дистанційне зондування Землі, кібербезпека космічної діяльності, блокчейн-технологія, видобування космічних ресурсів, відповідальна поведінка в космосі.

Сучасна космічна діяльність характеризується диверсифікацією в геометричній прогресії форм дослідження та використання космічного простору. Зростання комерційної привабливості та

лібералізація регулювання призвела до експонентного розширення кола суб'єктів, особливо приватних, які щороку виводять сотні, а то й тисячі супутників на орбіту навколо Землі. Це

Цитування: Малишева Н. Р., Гурова А. М. Довгострокова сталість космічної діяльності: нові виклики перед міжнародним і національним космічним правом. *Космічна наука і технологія*. 2022. **28**, № 6 (139). С. 63—73. <https://doi.org/10.15407/knit2022.06.063>

своєю чергою породжує питання пошуку балансу між економічно вигідним використанням цього ресурсу сьогодні та його збереженням для майбутнього. Виходячи з цього, на міжнародному рівні виникла ідея поширення концепції сталого розвитку на діяльність людства в такій просторовій частині навколишнього середовища, як космос.

На 62-й сесії Комітету ООН з використання космічного простору у мирних цілях (2019 р.) було презентовано Керівні принципи забезпечення довгострокової сталості космічної діяльності [9], де останню визначено як здатність підтримувати здійснення космічної діяльності у подальшому до нескінченності таким чином, щоб забезпечити досягнення цілей справедливого доступу до вигід від дослідження та використання космічного простору у мирних цілях задля забезпечення потреб теперішнього покоління, але при збереженні при цьому космічного середовища для майбутніх поколінь. А вже на 76-й сесії Генеральної асамблеї ООН 25 жовтня 2021 р. було прийнято Резолюцію 76/3 «Порядок денний «Космос-2030»: космос як двигун сталого розвитку», яка розглядається як перспективна стратегія, спрямована на посилення ролі космічних технологій в реалізації глобальних програм та у вирішенні питань забезпечення довгострокової сталості космічної діяльності [4].

З огляду на вказане, в Інституті держави і права імені В. М. Корецького НАН України було здійснено дослідження правових проблем, які охоплюються сферою довгострокової сталості космічної діяльності. Визначаючи сферу та предмет дослідження, наріжним каменем вирішено було покласти такі правовідносини, які дозволили б одночасно забезпечити пошук балансу комерційного аспекту космічної галузі вітчизняної економіки та відповідальну сталу поведінку усіх суб'єктів космічної діяльності в загальнопланетарному контексті. Виходячи з цього, а також зважаючи на правові проблеми, актуальні саме для України, виокремлено п'ять ключових сегментів відповідної проблематики, серед яких перші два були спрямовані на формулювання пропозицій щодо активізації ринку космічних послуг в Україні, а три інших — на формування

позиції України в системі ООН щодо співпраці з міжнародними партнерами з ключових аспектів забезпечення довгострокової сталості космічної діяльності.

Метою дослідження є виокремлення кола першочергових проблем забезпечення довгострокової сталості космічної діяльності в Україні і світі та надання рекомендацій щодо їхнього вирішення.

Для досягнення цієї мети визначено такі завдання:

- виявити причини гальмування впровадження одного з найбільш перспективних інструментів комерціалізації космічної діяльності в Україні — державно-приватного партнерства та сформулювати пропозиції задля його реальної реалізації;

- проаналізувати зарубіжні моделі правового регулювання однієї з найбільш комерційно розвинених галузей космічної діяльності у світі та Україні, а саме дистанційного зондування Землі з космосу та запропонувати заходи вдосконалення вітчизняного законодавства з урахуванням позитивного зарубіжного досвіду;

- розробити правові механізми боротьби з кіберзагрозами космічній діяльності за допомогою стимулювання розвитку новітніх засобів, зокрема таких, як блокчейн;

- прослідкувати за ключовими тенденціями правового регулювання видобування космічних ресурсів задля належної підготовки України до участі у відповідній царині космічної діяльності на засадах довгострокової сталості;

- сформулювати пропозиції щодо відповідальної поведінки як в космосі, так і у зв'язку з його використанням.

Всі ці завдання виконувались поетапно.

Для виконання першого етапу дослідження було проаналізовано сучасні наукові підходи до змісту поняття «*державно-приватне партнерство*» (надалі — ДПП) — правового механізму, який дозволяє поєднувати виконання традиційних державних функцій з можливостями приватного бізнесу. Виявлено загальні та специфічні для космічної галузі ознаки його договірних форм, а саме концесії, управління майном, спільної діяльності та змішаних договорів.

Окреслено основні проблемні аспекти кожного з них для розвитку окремих видів космічної діяльності, вказано на наявні законодавчі перепони на шляху реалізації відповідного правового інституту. Значну частину результатів виконання першого етапу дослідження було викладено у нашій роботі [16].

Разом з тим додатково до результатів, поданих у вказаній публікації, аналіз зарубіжного законодавства у сфері ДПП та практики його застосування в космічній галузі господарювання дають підстави зробити два висновки: а) платформовий механізм ініціювання ДПП створює умови для активного діалогу під час узгодження форм перспективного співробітництва, провідну роль в якому відіграють приватні суб'єкти; б) набір договірних форм ДПП, передбачених вітчизняним законодавством, суттєво не відрізняється від зарубіжних інструментів, а їхнє невикористання космічним сектором України зумовлюється цілою низкою процедурних перепон, створюваних як чинним космічним, так і договірним правом України. Так, перешкодою для участі вітчизняних приватних суб'єктів господарювання в концесійних договорах до набрання чинності у січні 2021 р. змін до Закону «Про космічну діяльність» вважалось положення ст. 4 Закону України «Про підприємництво», згідно з яким будь-яка діяльність, пов'язана з розробленням, випробуванням, виробництвом та експлуатацією ракетно-космічних, як і їхні космічні запуски із будь-якою метою, могла здійснюватися тільки державними підприємствами та організаціями. Разом з тим і після скасування цієї норми у космічній галузі не з'явилися договори про ДПП. Вказане свідчить про те, що це положення було не єдиним, що потребувало змін. Весь порядок укладення договорів у цій сфері потрібно переглянути.

По-перше, якщо держава в особі ДКА України бажає зберегти свою участь у акціонерних товариствах, які належать до сфери космічної діяльності, вона повинна діяти за ринковими «правилами гри» та пропонувати гарантії, які діють у межах ДПП на тристоронній основі (держава — товариство — інвестор). При цьому, оскільки одним з основних критеріїв створення сприятливого інвестиційного клімату є перед-

бачуваність, держава має гарантувати у межах ДПП умови, базовані на її участі в такому товаристві, які були б стабільними протягом усього строку дії договору щодо ДПП. Вказане, на нашу думку, сприятиме економічному зростанню змішаного за формою власності товариства, буде вигідним для приватного партнера (інвестора), а також сприятиме більш ефективній реалізації космічних програм держави. До того ж вважаємо положення ст. 1 Закону України «Про ДПП» [1] про те, що державні підприємства можуть брати участь в уже укладеному у межах ДПП договорі, таким, що не відповідає правовому статусу відповідних суб'єктів, оскільки такі підприємства (а також державні установи) краще володіють інформацією про внутрішньогосподарську специфіку діяльності, а отже здатні запропонувати більш соціально ефективний та економічно рентабельний проєкт ДПП. З цих підстав вбачається необхідним для стимулювання розвитку відносин з ДПП в космічній сфері надати державним підприємствам правомочності вступати у відносини ДПП на етапі ініціювання, а не розглядати їх лише як цілісний майновий комплекс, який є об'єктом укладеного договору без відома його керівництва та колективу. Зазначене не усуває з цих відносин суб'єкта управління, але сприяє підвищенню врахування ним внутрішньогосподарських інтересів підприємств, що перебувають у його управлінні. Таким чином, всі організаційно-правові форми, з огляду на відносну економічну самостійність, а також глибоку поінформованість про техніко-економічний потенціал свого устаткування, доцільно перевести з розряду об'єкта до категорії суб'єкта відповідних відносин, надавши їм певної автономності у процесі ініціювання відносин ДПП та участі в них.

По-друге, ДПП слід чітко відділяти від публічних закупівель та аутсорсингу (залучення зовнішніх виконавців до здійснення деяких неосновних завдань бізнес-проєктів на підрядних засадах), не зважаючи на деяку схожість цих інститутів. З усіх визначених в законодавстві форм ДПП договір про спільну діяльність є однією з найперспективніших форм залучення приватних партнерів до діяльності державних підприємств задля здійснення конкретних проєктів,

адже дозволяє вносити будь-які вклади, про які домовляться сторони, або виконувати окремих сегмент спільного проєкту за допомогою власних ресурсів. Разом з тим ця договірна форма передбачає необхідність врахування положення про те, що основні фонди державних підприємств, які не підлягають приватизації, не можуть бути внесками за договором про спільну діяльність. Використання договору про трансфер технологій для ДПП також має ряд переваг для розвитку космічної діяльності за рахунок об'єктів інтелектуальної власності, створених за бюджетні кошти, проте орієнтування вітчизняного законодавства в основному на іноземного інвестора може негативно позначитися на внутрішньодержавному трансфері, який має бути пріоритетним для розвитку національної космічної діяльності. Для зміни цієї ситуації необхідно переглянути в цій частині Закони України «Про трансфер технологій» та «Про космічну діяльність» і прийняти на їхній основі нормативно-правові акти для забезпечення сприятливих умов трансферу технологій, зокрема встановлення умов конкурсної передачі таких технологій, чітке визначення ціни об'єкта інтелектуальної власності, що передається, тощо.

Зазначені та деякі інші пропозиції були викладені у науковій записці «Щодо правового забезпечення державно-приватного партнерства для розвитку вітчизняної космічної галузі господарювання», направленої для можливого впровадження Державному космічному агентству ще у 2020 році, проте з огляду на те, що в космічній галузі з того часу не було ініційовано жодного договору про ДПП*, можна зробити висновки щодо врахування відповідних пропозицій.

Здійснивши дослідження другого з виділених завдань, а саме проаналізувавши більше десяти різноманітних моделей правового регулювання відносин з дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) з метою рецепції вітчизняним законодав-

* В цілому по Україні, за даними центральних органів виконавчої влади, станом на 2021 р. на умовах ДПП було укладено 192 договори (жодного в космічній галузі), з яких виконуються лише 39 договорів; 118 не виконуються, а 35 розірвані, або строк їхнього виконання завершився.

ством позитивного світового досвіду в цій сфері, було зроблено висновки про те, що оцінка можливостей врахування зарубіжного досвіду з регулювання ДЗЗ має брати до уваги державну чи приватну правову природу, ступінь розвитку відповідного ринку послуг в країні, а також враховувати організаційно-інституційну структуру забезпечення відповідних відносин; політику поширення даних; дозвільне регулювання діяльності із ДЗЗ та низку інших аспектів. Крім цього, було проведено детальне дослідження особливостей укладення договорів публічних закупівель саме даних ДЗЗ, на основі чого запропоновано модель проведення публічних закупівель Національним центром управління і випробування космічних засобів як центральної закупівельної організації та поєднання цього статусу з виконанням послуг із безпосереднього прийняття та обробки даних ДЗЗ. Основні результати виконання цієї частини дослідження були стисло викладені у наших публікаціях [12, 17].

Крім стимулювання економічного розвитку та соціального забезпечення космічними послугами, не менш важливим зрізом довгострокової сталості космічної діяльності є забезпечення від екологічних та інших загроз, серед яких ключову роль набувають кіберзагрози, дослідженню правових засобів боротьби з якими був присвячений третій етап дослідження. Наразі немає міжнародних документів, здатних комплексно врегулювати цю проблему. Натомість набуває розвитку поширене тлумачення відповідних норм національного космічного права, розроблення на їхній основі міжнародних рекомендацій та збірок кращих практик.

У цьому контексті в дослідженні було зроблено акцент на питанні, чи можна застосовувати до правовідносин із забезпечення кібербезпеки Конвенцію про міжнародну відповідальність за шкоду, завдану космічними об'єктами (надалі — Конвенція про відповідальність). З часу прийняття цієї Конвенції космічні об'єкти та механізми управління ними значно змінилися, тому вважаємо, що програмне забезпечення можна віднести до складових частин космічного об'єкта, які охоплюються поняттям «космічний об'єкт» і є його невід'ємною частиною. Кібе-

ратаки на програмне забезпечення космічного об'єкта можуть призвести до втрати контролю над ним або спровокувати зіткнення з іншим космічним об'єктом. І в цьому контексті посягання на програмне забезпечення космічного об'єкта підлягає захисту Конвенцією про відповідальність. Однак об'єктом кібератак можуть стати не тільки космічні об'єкти (спутники), але й сигнали між супутниками та наземною станцією управління, станцією ретрансляції даних, сегментом користування космічної системи, терміналами або пристроями, що використовуються для прийому або обробки супутникового сигналу. Вважаємо, що такі цільові об'єкти не можуть бути захищені Конвенцією про відповідальність, оскільки вона передбачає відповідальність за пошкодження саме космічних об'єктів. Та й у цьому випадку застосування Конвенції про відповідальність проблема доведення вини за шкідливі наслідки є справою не простою.

На основі аналізу концепції відповідальності за вини в космічному праві було запропоновано визначати в національному законодавстві космічних держав заходи із запобігання кібератакам, спрямовані як на збереження ресурсів суб'єктів космічної діяльності, насамперед приватних, від небезпек кібератак, так і на мінімізацію міжнародної відповідальності за національну космічну діяльність, що покладається на державу. Взірцевим у цьому контексті є законодавство США, в якому, крім розгалуженої системи норм щодо кібербезпеки, відповідні питання регулюються й Директивою з космічної політики № 5 від 04.09.2020, в якій вперше визначено, що принципи та практики кібербезпеки мають застосовуватись також до космічних систем. В Україні базове законодавство про кібербезпеку перебуває на стадії формування, тому розроблення спеціального правового забезпечення цих відносин для космічної сфери може зіштовхнутися зі значними проблемами. Внаслідок дублювань та прогалин в розмежуванні повноважень між Мінекономіки, а згодом Мінстратегпромом, з одного боку, та ДКА України — з іншого, незрозуміло, який із цих органів має бути відповідальним у сфері космічної діяльності за вказаний

сектор критичної інфраструктури. На нашу думку, вказану функцію мало б взяти на себе ДКА України. З часу проведеного нами дослідження було прийнято Закон України «Про критичну інфраструктуру», в ч. 4 ст. 9 якого космічна діяльність, космічні технології та послуги було віднесено до життєво важливих функцій та/або послуг, порушення яких призводить до негативних наслідків для національної безпеки України. Проте поки що незрозуміло, як саме діятиме механізм віднесення до об'єктів критичної інфраструктури та визначення категорії їхньої критичності в космічній галузі в контексті ймовірного повторного входження цієї галузі господарювання до сфери відання Міністерства економіки України та майбутньої діяльності нещодавно створеної Державної служби захисту критичної інфраструктури та забезпечення національної системи стійкості України [22]. Крім того, в оновленому законодавстві так і не знайшлося відповідей на висловлені в нашому дослідженні запитання: 1) який режим кіберзахисту буде забезпечено для приватних суб'єктів космічної діяльності, яких після внесення змін до Закону України «Про космічну діяльність», що набули чинності у січні 2020 року, стає дедалі більше; 2) як буде здійснюватись кіберзахист підприємств з різними видами космічної діяльності, кожен з яких вимагає своїх специфічних засобів захисту.

Окремої уваги в дослідженні правових засад кіберзахисту в сфері космічної діяльності застосовують юридичні аспекти блокчейн-технології, яка має багатофункціональний потенціал забезпечення довгострокової сталості космічної діяльності. Технологія блокчейн, інтегруючись в галузі господарювання, якісно її перетворює. Так само і нові відносини, які складаються на цьому ґрунті, потребують нового комплексного правового регулювання, що має охопити такі правові інститути: договірних права стосовно дотримання умов, за яких смарт-контракт визнається укладеним та чинним; електронного цифрового підпису, включаючи криптографічні ключі; захисту прав споживачів, які укладають смарт-контракти та мають добре розуміти сутність взятих на себе зобов'язань; захисту персональних даних, які в мережі блокчейн можуть

бути відкритими для всіх та не видаляються протягом функціонування мережі; цінних паперів та фінансового регулювання, зокрема відповідно до правил про запобігання відмиванню доходів; оподаткування та адміністрування (ліцензування, надання дозволів на діяльність, пов'язану із використанням технології блокчейн, зокрема хмарних послуг).

Таким чином, для якісного правового забезпечення використання технології блокчейн у різних галузях господарювання, прийняття так званого рамкового Закону, який визначав би відповідну термінологію та основні питання, пов'язані з блокчейн, є лише першим мінімально необхідним кроком, що має супроводжуватися подальшим перетворенням означених вище правових інститутів.

Вивчаючи питання довгострокової сталості космічної діяльності та використання новітніх технологій для її забезпечення, неможливо було не приділити увагу питанню видобування космічних ресурсів, яке відкриває двері до повного переформатування світової економіки, буквально розширюючи її до космічних масштабів; зміни у підходах до міжнародно-правового регулювання, але водночас несе й суттєві ризики безпеці в космосі та на Землі у зв'язку з космічною діяльністю. Саме тому, а також зважаючи на підписання Україною Домовленостей у рамках космічної програми «Артеміда», було обрано для дослідження **правові аспекти видобування космічних ресурсів на засадах сталості**.

Вивчення наявних правових, етичних, політичних рамок показує, що підхід до регулювання забезпечення сталого розвитку відображається через запобіжні заходи, встановлення вимог щодо раціонального використання ресурсів тощо. Міжнародним правом сьогодні здійснюється пошук інструментів регулювання відносин, які складаються у сфері дослідження, розвідки та розробки ресурсів небесних тіл. Чинні міжнародні договори з питань космічної діяльності лише частково можна застосувати до нових відносин, які складаються. Здійснюється пошук нових форм і засобів регулювання відповідних відносин [15]. Проблемою напрацювання узгодженого механізму міжнародно-правового ре-

гулювання видобування ресурсів космосу стала біполяризація правотворчого процесу, пов'язана з паралельним започаткуванням двох міжнародних програм: «Артеміда», засновником якої стало НАСА [20] і до якої, зокрема, приєдналась Україна, і Міжнародна наукова місячна станція, до реалізації якої приступили Роскосмос та Китайська Національна космічна адміністрація [13]. Основним завданням майбутньої діяльності Робочих груп з космічних ресурсів Юридичного підкомітету COPUOS буде пошук шляхів подолання нових викликів для міжнародного права, прийнятних для обох коаліцій, з таких проблем, як критерії встановлення зон безпеки; інституціоналізація визнання прав власності усіма учасниками; модель розподілу вигод (на основі ресурсів або полегшення доступу до них); взаємосумісність внутрішніх процедур авторизації та технічних стандартів, що забезпечуватимуть безпечну та сталу діяльність з видобування космічних ресурсів; авторитетні процедури вирішення суперечок.

Вбачаємо при цьому за необхідне проведення інвентаризації можливостей України щодо участі у цьому проєкті, поширивши знання про Програму, її особливості, пріоритети та умови участі серед високотехнологічних підприємств та організацій космічної галузі. У цьому процесі непересічну роль має відіграти Національна академія наук України, чимало інститутів якої орієнтовані на космічну діяльність і в змозі здійснити аналіз наукових і технологічних перспектив участі України в дослідженні та використанні ресурсів Місяця, а також Українська асоціація високотехнологічних підприємств і організацій «Космос», що об'єднує кілька десятків суб'єктів, здатних взяти участь в програмі «Артеміда».

Наростання міжнародної геополітичної напруги, яка вже вилилась в неспровоковану збройну агресію російської федерації проти України, разом із кібератаками на супутникові дані та супутники зв'язку, що набуває все більшого поширення, зокрема у космічному просторі, зумовило необхідність дослідити питання **відповідальної поведінки в космосі**, від якої значною мірою залежить довгострокова сталість космічної діяльності.

Так, Куан Вей Чен, науковий співробітник Університету МакГіл, наголошує в своєму дослідженні, що уряди та приватні оператори в своїй діяльності мають виходити з ключової максими про те, що космос є спільним надбанням, а тому діяльність однієї держави чи компанії неодмінно впливатиме на діяльність всіх інших [14]. З огляду на вказане, космічна діяльність все більше стала досліджуватись в контексті концепції «трагедії загального надбання», запропонованої екологом Гаретом Хардіном. Сутність цієї концепції полягає в тому, що порядок, який визначає свободу використання обмеженого ресурсу, приречений на руйнування. Визначена ст. 1 Договору про принципи діяльності держав з дослідження і використання космічного простору, включаючи Місяць та інші небесні тіла, відкритість для дослідження і використання та вільність доступу до всіх районів небесних тіл [28] уже створює тло для проявів такої трагедії. Так, протисупутниковий тест 15.11.2021, в межах якого РФ знищила свій супутник «Космос 1408» вагою 2200 кг, призвів до утворення на робочій висоті МКС та великої кількості діючих супутників (480 км) 1500 шматків небезпечного космічного сміття [24]. Нещодавній обмін вербальними нотами між США та Китаєм щодо ризику зіткнення угруповання «Старлінк» та космічної станції Китаю наприкінці 2021 р. [11] також свідчить про те, що космічний простір сьогодні не є виключеним зі сфер військового та економічного зіткнення, що безумовно є серйозною реальною небезпекою довгостроковій сталості космічної діяльності. Виходом з трагедії спільного надбання, на думку Г. Хардіна, є фундаментальне розширення моральності, тобто визнання необхідності [10]. І в цьому контексті необхідно знову «повернутись обличчям» до екологічних концепцій, серед яких найбільш актуальними для відповідної сфери є концепції екологічного боргу «la dette écologique» [19, с. 9] та принцип солідарності «le principe de la solidarité» [5, с. 694], побудовані на визнанні індивідуальної та колективної взаємозалежності людини і навколишнього середовища, що призводить до реконструкції відносин із ринкових до більш соціальних.

У науковій літературі в основному сходяться на тому, що процес створення всезагальних норм відповідальної поведінки в космосі формуватиметься із маленьких кооперацій між державами та приватними суб'єктами. Так, пропонується державам укласти угоди щодо управління територіями загального користування, уточнюючи свої зобов'язання ставитися до космосу як до спільного надбання та дотримуючись механізмів управління, які відображають це зобов'язання, для кращого досягнення національних цілей [25], політико-правова рамка для чого частково відображена в Домовленостях програми «Артеміда». При цьому робиться акцент на тому, що наявні та майбутні нові передові практики, рекомендації та стандарти повинні включати метод вимірювання відповідності, який приносить переваги суб'єктам, які їх дотримуються, і певні витрати для тих, хто їх не виконує [18].

Першим кроком у цьому напрямку є визначене Резолюцією ГА ООН від 24 грудня 2021 р. створення Робочої групи відкритого складу щодо зменшення космічних небезпек, до мандату якої входить винесення рекомендацій щодо можливих норм, правил та принципів відповідальної поведінки у зв'язку з загрозами для космічних систем з боку держав, включаючи, за обставинами, питання про те, як вони сприятимуть проведенню переговорів щодо юридично обов'язкових документів, зокрема щодо запобігання гонці озброєнь у космічному просторі [3]. Діяльність робочої групи передбачена на період 2022—2023 роки, та вже цього року свої позиції представили США, Китай, Франція, ФРН [23], Італія [21], РФ, УНІДІР, Міжнародний комітет Червоного Хреста та інші. Спільною позицією держав є джерельна база, з якої слід черпати норми відповідальної космічної діяльності. Так, всі погоджуються щодо доцільності застосування Статуту ООН, договорів про космос, а також рекомендаційних норм щодо транспарентності та зміцнення довіри, довгострокової сталості космічної діяльності, мінімізації космічного сміття, норм гуманітарного права. УНІДІР додає до цього переліку норми Договорів про часткову заборону ядерних випробувань та про заборону ядерної зброї, Конвенцію про заборону військового

чи будь-якого іншого ворожого використання засобів впливу на природне середовище, Режимів контролю за різними видами озброєння, Конвенції про біологічну та хімічну види зброї, концепцію «належного врахування» з норм повітряного права та концепцію «суверенітету» морського права. При цьому дивно, що серед джерел екологічного права чомусь було виділено лише Стокгольмську декларацію щодо навколишнього середовища і розвитку (1992 р.), що, на нашу думку, є вкрай недостатнім [8]. Міжнародний комітет Червоного Хреста також виділив ряд норм, які можуть бути застосовані задля забезпечення відповідальної поведінки в космосі, серед яких заборона прямої атаки на цивільні космічні об'єкти, так само як і невибіркові атаки та атаки на засоби забезпечення життєдіяльності [6].

Разом з тим підходи держав, як і при розробленні космічних договорів у часи холодної війни, розбились на два протилежних табори, по суті з тих самих підстав. Китай та РФ наполягають на прийнятті загальнообов'язкових норм щодо нерозміщення жодних видів озброєння в космосі, пропагуючи високу ефективність запропонованого ними проекту договору про запобігання розміщення зброї в космічному просторі, застосування сили чи погрози силою, а також ініційоване РФ уже без Китаю політичне зобов'язання щодо нерозміщення зброї в космосі першими, яке підтримали 30 держав, які не мають технічної можливості таку зброю розміщувати [7]. Таким чином, на цьому полюсі увага сконцентрована в основному на військових загрозах та небезпеках, що штовхає наприклад ту саму РФ цинічно вимагати не використовувати космічні засоби для протиракетної оборони, проти цілей на Землі або у повітрі, а також для ліквідації таких систем, вже наявних у держав. Крім цього, Китай непокоїть участь приватних підприємств у військовій космічній діяльності, у зв'язку з чим він закликає держави до більш пильного нагляду за їхньою діяльністю, зокрема щоб останні належним чином використовували телекомунікаційний спектр і орбітальні ресурси в космічному просторі, щоб не підривати права держав, що розвиваються, на мирне використання космічного простору [26], що вочевидь є відголоском декількох небез-

печних зближень між угрупованням «Старлінк» та Китайською космічною станцією. З іншого боку, США, ФРН, Франція, Італія та ряд інших держав наполягають на необхідності розроблення юридично обов'язкових норм, які відповідали б динаміці змін кращих практик космічної діяльності. Примітно, що ці держави більшу увагу приділяють саме подвійному використанню космічних систем, поділяючи небезпечну діяльність за окремими видами, які потребують специфічного регулювання, зокрема на радіоперешкоди, протисупутникові тести, кібератаки, різного роду атаки на космічну інфраструктуру на Землі тощо [29]. Крім того, держави цього блоку наголошують на необхідності неухильного дотримання всіх заходів транспарентності та зміцнення довіри, при цьому фокусуючи значну увагу на проблемі космічного сміття. Франція, зокрема, запропонувала розробити норму, яка б забороняла будь-які дії, які могли б призвести до утворення довготривалого та численного сміття в космосі [27].

Таким чином, ми можемо спостерігати черговий виток протистояння в космосі, який не надихає перспективою взаємного розуміння чи поваги до правових норм, незалежно від їхнього договірної чи добровільного характеру. Іронічно, що держава-агресор намагається максимально запевнити світ щодо свого наміру в необхідності розроблення певних загальнообов'язкових норм. При цьому вже сьогодні весь світ пересвідчився в тому, що ці норми ця держава виконуватиме виключно на свій розсуд. Однією із численних ілюстрацій цієї тези є ігнорування рішення про запровадження тимчасових заходів у Міжнародному суді ООН у справі «Україна проти Росії щодо геноциду» від 16.03.2022 [2]. З іншого боку, відчайдушне бажання запобігти розгортанню воєнних дій в космосі штовхає інші держави до вжиття заходів забезпечення транспарентності та зміцнення довіри в кооперації з тими, хто розуміє ці заходи... дуже своєрідно.

Україна, зазнавши нападу за самостійне обрання свого місця між цими двома таборами у відносинах на Землі, має практичний матеріал щодо формулювання пропозицій відповідальних дій і в космосі, ключову позицію в якому

повинні зайняти гарантії безпеки, що базуються на алгоритмі дій щодо недопущення невідповідальної поведінки, чи вжиття заходів, якщо таку поведінку таки було реалізовано. Поки в світі з обмеженим рівнем підґрунтя реалізації моральних норм окремими учасниками не досягнуто здатності забезпечити довгострокову сталість космічної діяльності, найбільш ефективним механізмом є стримування. Саме тому наші наукові зусилля в цій частині спрямовані на вироблення пропозицій, які від імені України могли б бути спрямовані Робочій групі відкритого складу щодо зменшення космічних небезпек, а також Комітету ООН з використання космічного про-

стору у мирних цілях для їхнього врахування при розробленні міжнародних документів щодо зменшення космічних загроз шляхом прийняття норм, правил і принципів відповідальної поведінки.

Підводячи підсумки, вбачаємо за необхідне висловити подяку НАН України за впровадження Цільової комплексної програми НАН України з наукових космічних досліджень на 2018—2022 рр., яка надала нам можливість провести дослідження у межах узагальнюючої проблематики правового забезпечення довгострокової сталості космічної діяльності.

REFERENCES

1. About public-private partnership. Law of Ukraine dated 1.07.2010 (as amended). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2404-17#Text> (Last accessed: 09.09.2022).
2. Allégations de Génocide au Titre de la Convention pour la Prévention et la Répression du Crime de Génocide (Ukraine c. fédération de russie). 16 mars 2022, Ordonnance. URL: <https://www.icj-cij.org/public/files/case-related/182/182-20220316-ORD-01-00-EN.pdf> (Last accessed: 09.09.2022).
3. A/RES/76/231 30. Prevention of an arms race in outer space: reducing space threats through norms, rules and principles of responsible behaviours. Resolution adopted by the General Assembly on 24 December 2021. URL: <https://documents-dds-ny.un.org/doc/UNDOC/GEN/N21/417/21/PDF/N2141721.pdf?OpenElement> (Last accessed: 09.09.2022).
4. A/RES/76/3. The «Space2030» Agenda: space as a driver of sustainable development. URL: https://www.unoosa.org/oosa/ooasdoc/data/resolutions/2021/general_assembly_76th_session/ares763.html (Last accessed: 09.09.2022).
5. Camproux Duffrène M.-P. (2020). Les communs naturels comme expression de la solidarité écologique. *Revue Juridique de l'Environnement*, 4, 689—713.
6. Constraints under International Law on Military Operations in, or in Relation to, Outer Space during Armed Conflicts. Working paper submitted by the International Committee of the Red Cross to the open-ended working group on reducing space threats through norms, rules and principles of responsible behaviours, as convened under United Nations General Assembly Resolution 76/231, and to the Secretary-General of the United Nations in reply to General Assembly Resolution 76/230 on “Further practical measures for the prevention of an arms race in outer space”. 3 May 2022. URL: https://documents.unoda.org/wp-content/uploads/2022/05/ICRC-working-paper-on-the-constraints-under-international-law-on-military-space-operations_final_en.pdf (Last accessed: 09.09.2022).
7. Document prepared by the Russian Federation in connection with the open-ended working group established pursuant to General Assembly resolution 76/231 on reducing space threats through norms, rules and principles of responsible behaviours. Submitted by the Russian Federation. URL: <https://documents-dds-ny.un.org/doc/UNDOC/GEN/G22/329/81/PDF/G2232981.pdf?OpenElement> (Last accessed: 09.09.2022).
8. Existing Legal and Regulatory Frameworks concerning threats arising from State behaviours with respect to outer space. Submitted by the United Nations Institute for Disarmament Research (UNIDIR). Open-ended working group on reducing space threats through norms, rules and principles of responsible behaviours. Geneva, 9—13 May 2022. URL: <https://documents-dds-ny.un.org/doc/UNDOC/GEN/G22/248/57/PDF/G2224857.pdf?OpenElement> (Last accessed: 09.09.2022).
9. Guidelines for the Long-term Sustainability of Outer Space Activities. A/AC.105/2018/CRP.20. URL: https://www.unoosa.org/res/ooasdoc/data/documents/2018/aac_1052018crp/aac_1052018crp_20_0_html/AC105_2018_CRP20E.pdf (Last accessed: 09.09.2022).
10. Hardin G. (1968). The Tragedy of the Commons. *Science, New Ser.*, **162**, № 3859, 1243—1248. URL: <http://www.jstor.org/stable/1724745> (Last accessed: 09.09.2022).
11. Hitchens T. (2022). US Rejects Charge that Starlink satellites endangered Chinas Space Space. URL: <https://breakingdefense.com/2022/02/us-rejects-charge-that-starlink-satellites-endangered-chinas-space-station/> (Last accessed: 09.09.2022).

12. Hurova A. M., Malolitneva V. K. (2021). Institutional and legal model for public procurement of products of Earth observation in Ukraine. *Space Sci. and Technology*, **27**, № 3, 93—107. URL: <http://knit.mao.kiev.ua/en/archive/2021/3/09>.
13. International Lunar Research Station. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/International_Lunar_Research_Station (Last accessed: 09.09.2022).
14. Kuan-Wei Chen. Outer space is not the Wild West: There are clear rules for peace and war. URL: <https://www.space.com/outer-space-clear-rules-peace-and-war> (Last accessed: 09.09.2022).
15. Malysheva N. R. (2021). International legal principles governing exploration of Moon, Mars and other celestial bodies' resources. *Space Sci. and Technology*, **27**, № 4, 74—82. URL: <http://knit.mao.kiev.ua/en/archive/2021/4/08>.
16. Malysheva N. R., Hurova A. M. (2019). Legal forms of public-private partnership for the space activity of Ukraine and its distinction from related forms of contractual cooperation. *Space Sci. and Technology*, **25**, № 1, 73—84. URL: <http://knit.mao.kiev.ua/en/archive/2019/1/0>.
17. Malysheva N. R., Hurova A. M. (2020). Models of legal regulation of the remote sensing activities in the world: experience for Ukraine. *Space Sci. and Technology*, **25**, № 4, 86—110. URL: <http://knit.mao.kiev.ua/en/archive/2020/4/08>.
18. McClintock B., Feistel K., Ligor D. C., Oconnor K. Responsible Space Behavior for the New Space Era. Preserving the Province of Humanity. URL: https://www.rand.org/content/dam/rand/pubs/perspectives/PEA800/PEA887-2/RAND_PEA887-2.pdf (Last accessed: 09.09.2022).
19. Michelot A. La dette écologique en question : propos introductifs. La dette écologique: définition, enjeux et perspectives. Montréal, Québec, 218 p.
20. NASA Artemis. URL: <https://www.nasa.gov/specials/artemis/> (Last accessed: 09.09.2022).
21. National contribution to the work of the Open-Ended Working Group on reducing space threats through norms, rules and principles of responsible behaviours. Submitted by Italy. Geneva, 9—13 May 2022. URL: <https://documents.unoda.org/wp-content/uploads/2022/03/Italy-Contribution-to-the-OEWG.pdf> (Last accessed: 09.09.2022).
22. On the formation of the State Service for the Protection of Critical Infrastructure and Ensuring the National System of Ukraine's Stability. Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine No. 787 of July 12, 2022 URL: <https://www.kmu.gov.ua/npas/pro-utvorennia-derzhavnoi-sluzhby-zakhystu-krytychnoi-infrastruktury-ta-zabezpechennia-natsionalnoi-systemy-stiikosti-ukrainy-787-120722> (Last accessed: 09.09.2022).
23. Responsible behaviours as a practical contribution to the prevention of an arms race in outer space and to strengthening the international frameworks on space security. Submitted by Germany. Open-ended working group on reducing space threats through norms, rules and principles of responsible behaviours Geneva, 9—13 May 2022. URL: https://documents.unoda.org/wp-content/uploads/2022/05/A_AC294_2022_WP6_E_Germany.pdf (Last accessed: 09.09.2022).
24. Russian ASAT Test Creates Massive Debris. Arms Control Association. December 2021, By Shannon Bugos. URL: <https://www.armscontrol.org/act/2021-12/news/russian-asat-test-creates-massive-debris> (Last accessed: 09.09.2022).
25. Silverstain B., Panda A. (2021). Space is the great common. Its time to treat it as such. Carnegie endowment for international peace. URL: <https://carnegieendowment.org/2021/03/09/space-is-great-commons-it-s-time-to-treat-it-as-such-pub-84018> (Last accessed: 09.09.2022).
26. Submission of China Pursuant to United Nations General Assembly Resolution 76/230. Open-ended working group on reducing space threats through norms, rules and principles of responsible behaviours. Geneva, 9—13 May 2022. URL: https://documents.unoda.org/wp-content/uploads/2022/05/A_AC294_2022_WP10_E_China.pdf (Last accessed: 09.09.2022).
27. The importance of space capabilities for our lives and our societies. Current context and benefits of establishing norms of responsible behaviour. Submitted by France. Open-ended working group on reducing space threats through norms, rules and principles of responsible behaviours. Geneva, 9—13 May 2022. URL: <https://documents-dds-ny.un.org/doc/UNDOC/GEN/G22/339/25/PDF/G2233925.pdf?OpenElement> (Last accessed: 09.09.2022).
28. Treaty on Principles Governing the Activities of States in the Exploration and Use of Outer Space, including the Moon and Other Celestial Bodies. URL: <https://www.unoosa.org/oosa/en/ourwork/spacelaw/treaties/introouterspacetreaty.html> (Last accessed: 09.09.2022).
29. United States of America National Submission to the United Nations Secretary General Pursuant to UN General Assembly Resolution 75/36 Reducing space threats through norms, rules and principles of responsible behaviours. Geneva, 9—13 May 2022. URL: <https://documents.unoda.org/wp-content/uploads/2022/05/04292021-US-National-Submission-for-UN-GA-Resolution-75.36.pdf> (Last accessed: 09.09.2022).

Стаття надійшла до редакції 09.09.2022

Після доопрацювання 16.09.2022

Прийнято до друку 17.09.2022

Received 09.09.2022

Revised 16.09.2022

Accepted 17.09.2022

N. R. Malysheva, Head of the Department of Agrarian Law, Land Law, Environmental Law and Space Law, of the Koretsky Institute of State and Law National Academy of Sciences of Ukraine, Deputy Director of the International Center for Space Law at the V. M. Koretsky Institute of State and Law, Doctor of Law, Professor, Academician of the National Academy of Legal Sciences, Corresponding Member of International Academy of Astronautics, IAA, Honored Lawyer of Ukraine, the Winner of State Awards in Science and Technology of Ukraine

ORCID: 0000-0001-6630-227X

E-mail: nataliia_malysheva@ukr.net

A. M. Hurova, Research Fellow of the Department of Agrarian Law, Land Law, Environmental Law and Space Law, of the Koretsky Institute of State and Law National Academy of Sciences of Ukraine, Ph.D. in Law.

ORCID: 0000-0003-4134-761X

E-mail: a.m.hurova@gmail.com

V. M. Koretsky Institute of State and Law National Academy of Sciences of Ukraine

4 Triokhsviatytska Str., Kyiv, 01601 Ukraine

LONG-TERM SUSTAINABILITY OF SPACE ACTIVITIES: NEW CHALLENGES FOR INTERNATIONAL AND NATIONAL SPACE LAW

The results of the study of legal problems, which are relevant for ensuring the long-term sustainability of space activities, the course of which has been declared by the UN as a guide, are highlighted. Legal relations are singled out, which on the one hand, allow revitalizing of the commercial component of the space industry of the domestic economy, and on the other — contribute to the establishment of responsible, sustainable behaviour of all subjects of space activity on a global scale. From this point of view, the specific problems of public-private partnership in the space industry are considered, proposals are put forward regarding the legal model for the regulation of remote sensing of the Earth, challenges to international and national law in connection with cyber threats to space activities, including the use of blockchain technology, are emphasized, the international legal problems of regulating the extraction of space resources from the point of view of ensuring the sustainability of this activity and the need to develop legal mechanisms, norms, and principles of responsible human behaviour in space are accentuated.

As a result of the study, the following were proposed: 1) legal means of liberalizing the participation of state-owned enterprises as subjects and not objects of public-private partnerships, 2) a model for the regulation of relations to provide Ukraine with EO data, including through public procurement by the National Space Facilities Control and Test Center, 3) international legal and national legal mechanisms for combating cyber threats to space activities, 4) rules that should be developed to regulate activities for the extraction of space resources, as well as 5) rules for ensuring responsible behaviour in space.

Keywords: long-term sustainability of space activities, public-private partnership, remote sensing of the Earth, cyber security of space activities, Blockchain technology; extraction of space resources, responsible behaviour in space.

<https://doi.org/10.15407/knit2022.06.074>
УДК 001(091).620

О. Я. ПИЛИПЧУК, зав. кафедри, д-р біол. наук, проф.

E-mail: olegpilipchuk47@gmail.com

О. Г. СТРЕЛКО, д-р іст. наук, проф.

E-mail: olehstrelko@gmail.com

О. О. ПИЛИПЧУК, д-р іст. наук, доцент

E-mail: oksanapilipchuk78@gmail.com

Державний університет інфраструктури та технологій
вул. Кирилівська 9, Київ, Україна, 04071

С. А. ПОДОЛИНСЬКИЙ В ЕНЕРГЕТИЧНОМУ ТРАКТУВАННІ ЕВОЛЮЦІЇ ПРИРОДИ І СУСПІЛЬСТВА

Сергій Андрійович Подолинський (1850—1891) — дослідник природи, натурфілософ, лікар, громадський діяч і публіцист, прожив коротке життя. До цього часу з основними працями С. А. Подолинського наукове співтовариство майже не знайоме. Великий український науковець В. І. Вернадський надихався науковими роботами та ідеями С. А. Подолинського. А характеристика С. А. Подолинського як «забутого наукового новатора», яку дав йому В. І. Вернадський ще на початку ХХ ст., залишається в основному справедливою і в наші дні.

Стаття присвячена історії його роботи «Праця та її стосунок до розподілу енергії» (1880 р.). Висвітлено низку питань щодо ідеї С. А. Подолинського про «розподіл сонячної енергії у Всесвіті» та енергетичного трактування розвитку природи і суспільства. Здійснено аналіз кожного розділу статті С. А. Подолинського в контексті впливу праці на перерозподіл сонячної енергії на земній поверхні.

Ідеї С. А. Подолинського, викладені в його роботі «Праця людини та її стосунок до розподілу енергії» свідчать не тільки про пріоритет вітчизняної науки з багатьох питань природознавства, актуальність яких усвідомлюється тільки в наш час, а й зберігають методологічну цінність у світовому контексті. У праці С. А. Подолинського читач знайде приклад постановки і підходу до вирішення цікавої і потрібної проблеми в науковій сфері, який характерний для видатних і оригінальних вчених.

Найбільш важливим є відкриття С. А. Подолинським про те, що розвиток живих організмів на земній поверхні відбувається під впливом сонячної енергії. Ось чому ім'я С. А. Подолинського заслужено згадується серед попередників В. І. Вернадського, який займався вивченням енергетики живої речовини і становленням вчення про біосферу і ноосферу. Розглядається значення праці С. А. Подолинського та її подальші перспективи в розвитку наукових досліджень з використання енергії.

Ключові слова: С. А. Подолинський, сонячна енергія, розподіл енергії.

Сергій Андрійович Подолинський (1850—1891) — дослідник природи, натурфілософ, лікар, громадський діяч і публіцист, прожив коротке життя. Досі з основними працями С. А. Подолинського наукове співтовариство майже не знайоме. Великий український науковець В. І. Вер-

надський надихався науковими працями та ідеями С. А. Подолинського [6]. А характеристика С. А. Подолинського як «забутого наукового новатора», яку дав йому В. І. Вернадський ще на початку ХХ ст. [1], залишається в основному справедливою і в наші дні. Ім'я С. А. Подолин-

Цитування: Пилипчук О. Я., Стрелко О. Г., Пилипчук О. О. С. А. Подолинський в енергетичному трактуванні еволюції природи і суспільства. *Космічна наука і технологія*. 2022. **28**, № 6 (139). С. 74—84. <https://doi.org/10.15407/knit2022.06.074>

ського згадується не часто, а поширена оцінка його особистості як революційного демократа, що розвивав економічні ідеї, є дуже однобічною і збідненою. Поряд з цим ідеї С. А. Подолинського, викладені вперше у 1880 р. у великій статті «Праця людини та її стосунок до розподілу енергії», заклали основи принципово нової теорії праці, не тільки як суто економічної, а й природничо-історичної і моральної категорії, так званої *енергетичної концепції*. Розвиток його ідей — справа майбутнього.

С. А. Подолинському властивий широкий, систематичний погляд на природничу історію. Він зробив суттєвий внесок у природознавство і суспільствознавство, а також мав значний вплив на формування вчення про біосферу В. І. Вернадського. З цього приводу В. І. Вернадський у своїй праці «Матеріали з історії науки в Росії» так писав: «Людство не тільки відкриває нове, невідоме, незрозуміле в навколишній природі — воно одночасно відкриває у своїй історії численні забуті проблески розуміння окремими особистостями довгої, непомітної і неусвідомленої роботи поколінь. Досягнувши нового і невідомого, ми завжди із здивуванням знаходимо у минулому попередників» [2, С. 56]. Одним з таких попередників В. І. Вернадського і був Сергій Андрійович Подолинський.

Безперечно, вершиною природничо-наукової творчості С. А. Подолинського вважається його стаття «Праця людини та її стосунок до розподілу енергії», яка була опублікована в журналі «Слово» [7]. Стаття відразу викликала широкий резонанс, і за короткий час її було перекладено декількома мовами світу. Дуже важливою стала концепція С. А. Подолинського про те, що розвиток живих організмів на земній поверхні відбувається під впливом сонячної енергії. Ім'я С. А. Подолинського має заслужено зайняти гідне місце серед імен попередників В. І. Вернадського, які займалися вивченням енергетики живої речовини і становленням вчення про біосферу і ноосферу [9]. Економічна теорія, соціологія, екологія, географія, краєзнавство, медицина і гігієна, космологія — такими були сфери його наукових інтересів [3]. Мова і термінологія С. А. Подолинського своєрідні, але не слід за-



бувати, що перед нами роздуми зовсім молодого талановитого натураліста, спрямовані на постановку проблеми, а не на її остаточне вирішення. Зауважмо, що його новаторські ідеї були висловлені в часи, коли ще не сформувалися такі наукові дисципліни, як фізика Сонця, геофізика, астрофізика і біофізика з їхнім сучасним потужним арсеналом теоретичних методів і засобів обробки спостережних даних, а терміни «Всесвіт» і «розподіл енергії у Всесвіті» вживалися для опису нашої Сонячної системи і зоряного населення нашої Галактики як «острівного Всесвіту», оскільки існування інших галактик ще не було встановлено.

Мета статті С. А. Подолинського розкрита вже у першому її абзаці: «Праця людини і тих тварин, до дій яких підходить поняття про працю, є одним з численних видів прояву загальної світової енергії. Якими б різноманітними та плутаними не були сьогодні поняття про працю, ми маємо надію, що в такому загальному вигляді наше визначення не матиме заперечень. Метою нашою була спроба, виходячи із цього загального положення, з'ясувати значення умов, які супроводжують походження праці, подати головні прояви її в житті організмів і вказати на наслідки споживання праці, тобто на наслідки впливу працюючих людей і тварин на навколишнє середовище» [7, С. 135].

У *першому розділі* своєї статті С. А. Подолинський зазначає, що необхідно «визнавати усі

види енергії кінетичними», тобто такими, що є рухомими. Що поділ енергії на кінетичну і потенційну обумовлено лише тим, що перша є рухом, який «доступний нашому відчуттю», тоді як друга — також рух, але «не доступний нашому відчуттю». Приклад потенційної енергії — лавина, яка нависла над прірвою, заряджена гармата, або їжа людини, ще не перетворена на м'язове скорочення при роботі. І далі С. А. Подолинський наголошує, що «Сонце посилає у світовий простір енергію у вигляді «теплових, світлових, хімічних променів, магнетизму», і таке постійне передавання енергії з часом повинно призвести до повсюдного вирівнювання енергії. Енергія Всесвіту постійно переходить з легко перетворюваних форм до більш стійких, і внаслідок цього можливість перетворення енергії постійно зменшується, — з таким висновком С. А. Подолинського погоджувався і В. І. Вернадський [5]. Цю властивість енергії до перерозподілу і повсюдного вирівнювання називають, згідно з Р. Клаузіусом, — ентропією. Основні положення теорії Р. Клаузіуса: енергія Всесвіту постійна, і ентропія Всесвіту прямує до максимуму. Сонце продовжує забезпечувати нас величезною кількістю неперетвореної енергії, і запасання її ще дуже значне. Проте, як зазначає С. А. Подолинський, з цього не випливає, що розподіл перетвореної енергії на земній кулі є найбільш вигідним для людського життя. А можливість більш вигідного розподілу цієї енергії перебуває в руках самої людини.

У *другому розділі* статті С. А. Подолинський розглядає види перетвореної енергії, що є на Землі. І налічує таких видів аж сім.

1. На першому місці за величиною є енергія обертання Землі навколо Сонця і навколо своєї осі. Автор статті наводить приклад, згідно з яким, якби Земля раптово зупинилася у своєму обертанні навколо Сонця, то звільнилася б така кількість тепла, яка дорівнювала б кількості тепла, отриманого від спалювання вугільного шару, який перевищує Землю у 14 разів. Енергія обертання Землі навколо своєї осі частково перетворюється на теплоту за допомогою тертя об «масу води, яка залишається під дією припливів від руху Землі» (у системі Земля + Місяць, як ми

розуміємо це зараз). Користуючись силою припливу, пише С. А. Подолинський, для приведення у дію машин, наприклад млинів, ми запасемося цією силою у період підйому або набігання приливної хвилі. Ми утримуємо частину води на відомій висоті, вичікуємо час відпливу і відтак маємо користь з її падіння. Поки що обертання Землі навколо своєї осі майже не застосовується як джерело рушійної сили.

2. Внутрішня теплота Землі. Вона виявляється під час землетрусів і виверження вулканів, тривалість яких у більшості має випадковий і неправильний характер, щоб слугувати джерелом енергії для промислового і іншого застосування. Земний магнетизм відіграє практичну роль у мореплаванні, при виготовленні наукових приладів тощо. Гарячі ресурси можуть слугувати для технічних цілей, опалення житла і теплиць.

3. Ненасичена хімічна спорідненість, за винятком вільного кисню атмосфери, якої майже немає на земній поверхні.

4. Рух повітря, або вітер.

5. Сила падаючої води.

6. Вільна хімічна спорідненість, яка перебуває у паливі органічного походження.

7. Перетворювана енергія в живих рослинах, тваринах і людях.

У *третьому розділі* статті С. А. Подолинський аналізує проблему збереження енергії до появи органічного життя на поверхні Землі. Енергія ненасиченої спорідненості на той час була дуже малою. Земля тоді, мабуть, отримувала сонячних променів дещо більше, ніж у теперішній час, однак і розсіювала свою енергію значно швидше, ніж тепер, — розмірковує С. А. Подолинський. Велика кількість променевої енергії, отримуваної від Сонця, дуже мало збільшувала кількість перетвореної енергії на Землі. Промені Сонця не знаходили на поверхні таких тіл, на які вони могли діяти, як діють тепер за допомогою рослин, тобто розкладати насичені сполуки. Вони в той же час відбивалися в атмосферний простір. За винятком руху нагрітого повітря і води, піднятої випаровуванням, «променева сонячна енергія» майже не перетворювалася тоді на Землі в енергію. В той час ще не було життя на земній поверхні, коли вуглець теперішнього кам'яного

вугілля з киснем теперішньої атмосфери складало разом насичену, тобто позбавлену перетворюваної енергії сполуку (CO_2), загальний бюджет перетворюваної енергії був меншим, ніж тепер. Для того щоб при вичерпних джерелах енергії на земній поверхні могло відбутися накопичення перетвореної енергії, необхідний процес перетворення енергії (теплоти) на вищу форму, яка досить легко перетворюється на механічний рух, — вважав С. А. Подолинський.

Далі С. А. Подолинський перелічує основні способи, якими сонячна енергія може перетворитися на механічний рух. Це надання руху повітря за допомогою зміни його пружності, підняття води шляхом випаровування, хімічна дисоціація за допомогою рослин, м'язова робота тварин і людини, винайдення і облаштування штучних двигунів, які могли працювати за допомогою психічної і м'язової роботи людини і вищих тварин.

Четвертий розділ статті С. А. Подолинського присвячений появі рослин на земній поверхні та їхній ролі у перерозподілі енергії. Поява органічного життя на суші докорінно змінила не тільки вигляд і властивості поверхні Землі, а й також кількість і спосіб розподілу вищих видів енергії. С. А. Подолинський не цікавився питаннями про першу появу організмів. Він вважав, що значно важливішим слід вважати проблему їхнього розмноження і поширення. Організми поширюються тому, що з успіхом витримують боротьбу за існування з неорганічною природою, бо володіють більшим запасом перетвореної енергії. Володіючи цим запасом, а також здатністю до механічного руху, наприклад росту кореня донизу, а стебла доверху, і маючи майже монополію на збереження сонячної енергії, що містить у собі значну її частину, здатну до перетворення на вищі форми, рослини з успіхом здійснювали і продовжують здійснювати досі це перетворення.

С. А. Подолинський вважав, що дуже важливою особливістю рослин є їхня здатність за допомогою «хімічних променів Сонця» розкласти у звичайних умовах такі стійкі сполуки, як вуглекислий газ і воду. Згідно з С. А. Подолинським, рослини є дуже злими ворогами перерозподілу енергії світла. Вони зберігають сонячну енергію,

перетворюючи її на земній поверхні, не нагріваючи її, не підвищуючи її температуру, не збільшуючи її втрати. Рослини накопичують енергію, здатну до подальших перетворень. Іншими словами, в них здійснюється робота з підйому частини сонячної енергії з нижчого ступеня на вищий ступінь (як зазначав В. Томсон відбувалося «підняття енергії в ступені»). С. А. Подолинський вважав, що оскільки рослина зберігає сонячну енергію, протягом року, вирахувати її ще дуже важко. Для цього слід було б знати кількість тепла, отриманого усіма рослинами на Землі, та кількість спорідненості, яка зберігається протягом року через розкладання вугільної кислоти, аміаку та інших насичених або близьких до насичених сполук. Оскільки в деяких країнах Європи вже були зроблені розрахунки необхідної кількості тепла, потрібного для того, щоб довести до зрілості різні сорти хлібів та інших оброблюваних рослин (оскільки середні врожаї цих рослин були відомі, а склад ґрунту завжди може бути визначеним), то можна надіятися, — робив висновок С. А. Подолинський, — що скоро вдасться визначити, який процент отримуваної від Сонця енергії може зберегти у вищій формі живильні речовини і кількість палива десятини пшениці або у матеріалі для одягу десятини коноплі і т. п. Сьогодні найбільшою перешкодою для такого визначення енергії полягає не у обчисленні збереженої енергії, а у перерозподілі енергії отримуваної. Без сумніву, на життя рослин мають вплив, окрім теплоти сонячних променів, ще й світло, і хімічна дія їх, а для них еквіваленти в теплоті або механічній роботі ще не можуть бути знайдені з достатньою точністю [1, С. 154—155].

Таким чином, рослини зупиняються на половині шляху. Вони тільки накопичують енергію, і лише тоді накопичена рослинами енергія витрачається на піднесення нової її кількості на вищий ступінь, коли цей запас входить до складу їжі людини або тварини, або слугує паливом для машин, побудованих і керованих працею людини.

У *п'ятому розділі* статті С. А. Подолинський переходить до розгляду ролі тварин і людини в розподілі енергії і вводить поняття про працю.

Він відзначає, що у всі часи існування тварин на Землі частина рослин йде їм у їжу, і в тому випадку збережена ними (рослинами) сонячна енергія починає відігравати зовсім іншу роль. Тварини перетворюють частину збереженої енергії у вищу її форму — механічну роботу, але потім розсіюють її невимушено, тобто не використовують витрату її на нове перетворення сонячної енергії на вищі форми.

Автор статті наголошує, що ми тут маємо два процеси, які складають життєвий кругообіг. Рослини зберігають відому кількість енергії, але тварини, поїдаючи рослини, перетворюють при цьому частину збереженої енергії в механічну роботу і розсіюють перетворювану енергію, яка міститься у споживаних ними рослинах. Якщо кількість збереженої рослинами енергії перевершує її кількість, розсіювану тваринами, то відбувається накопичення енергії, наприклад у вигляді шарів кам'яного вугілля. Але оскільки ця запасена енергія перебувала під землею, то первісні люди не могли нею скористатися, і вона не входила у щорічний бюджет органічного життя. С. А. Подолинський відзначав, що якби тваринне життя переважало над рослинним, то, втрапивши запаси поживних речовин рослин, тваринне життя скоротилося б відповідно до кількості енергії, яка зберігається рослинами. Це був би свого роду застій, не дивлячись на наявність життя. Причина такого застою незрозуміла, — розмірковує С. А. Подолинський. Вона полягає в тому, що вищі форми енергії, здобуті рослинами і тваринами, безкорисно розсіюються у просторі, а не спрямовуються на єдино корисну в плані збільшення енергії на Землі роботу, тобто на нове перетворення нижчих форм енергії на вищі.

С. А. Подолинський каже, що поглянувши навколо себе, ми переконуємося в тому, що в даний час такого застою не спостерігається. Кількість сонячної енергії, яка набуває на земній поверхні вигляду енергії більш перетворюваної, без сумніву, поступово збільшується. Кількість свійських тварин і людей постійно зростає. Вони разом представляють собою більше живої речовини і споживають більшу частину поживного матеріалу, який накопичується рослинами, ніж

дикі тварини. Автор статті наводить приклад, що є «країни, які колись були багатими, і сьогодні перетворені ледве не на пустелі, але такі метаморфози дуже часто залежать від помилок в господарстві». Загалом, каже С. А. Подолинський, потрібно визнати, що з часу появи людства значно збільшилась продуктивність поживного матеріалу, який поглинає запас перетворюваної енергії на земній поверхні.

Узагальнюючи викладене, ми бачимо, що С. А. Подолинський аналізує розподіл енергії на земній поверхні згідно з головними етапами її еволюції: при відсутності на ній життя; відтак при його появі і розвитку; і нарешті, зростаючий вплив праці людини на цей розподіл енергії. Французький вчений Е. Леруа (1870—1854) зазначив, що домінантними двома факторами у минулій історії Землі були: оживлення матерії і олюднення життя [4, С. 22].

Єдиною причиною фіксації додаткової кількості сонячної енергії, вважав С. А. Подолинський, є споживання праці людини. Звідси вчений визначає поняття «праця». Він писав: «Праця є таке споживання механічної і психічної роботи, накопиченої в організмі, яке має результатом збільшення кількості перетворюваної енергії на земній поверхні» [1, С. 160]. Невдовзі С. А. Подолинський сформулював «Закон С. А. Подолинського»: «Праця людини є процесом природи, який підсилює потужність і розкриває фізичну природу додаткової вартості». Німецький історик Ф. Енгельс назвав цей закон (стосовно сільськогосподарського виробництва) «справжнім відкриттям».

У своїй статті С. А. Подолинський зазначає, що людина певними вольовими діями здатна збільшувати долю енергії, яка накопичується на земній поверхні і зменшити кількість енергії, яка перерозподіляється у просторі. Культивує рослини на нових землях, або розширюючи використання старих земель, осушуючи болота або зрошуючи посушливі місцевості, застосовуючи покращення сорту і сільськогосподарської машини, захищаючи рослини від природних ворогів, людина досягає першої мети. Виганяючи або винищуючи шкідників рослин і тварин, використовуючи працю ремісників, винахідників ма-

шин, процеси виховання і освіти підростаючого покоління, люди досягають другої мети.

С. А. Подолинський відзначає, що вже на найбільш ранній стадії розвитку людини енергія харчування частково переходить в механічну і психічну роботу (наприклад у виготовлення знарядь праці або зброї, будівництво житла або приручення тварин), яку слід віднести до корисної праці, тобто до діяльності, яка збільшує кількість енергії, що зберігається. Однак не тільки у первісної людини, а й деяких тварин ми повинні визнати наявність здатності до праці, і при цьому не тільки у свійських тварин, окрім втручання людини. Сюди можуть бути віднесені і мурахи, у яких є розподіл праці; птахи, які удосконалюють конструкції своїх гнізд; бобри з їхніми будівничими здібностями і т. п. Без сумніву, такі дії мають результати збереження частини енергії тварини, що перетворюється у процесі перерозподілу. В цьому плані будівництво житла у тварин переслідує ті ж цілі і сягає тих же результатів, що і в людини.

С. А. Подолинський вважав, що у первісної діяльності людини праця ще не була важливим елементом. М'язову роботу далеких прашурів не слід порівнювати з корисною працею. Вони працювали багато, однак у результаті дуже небагато збільшувався запас перетворюваної енергії на земній поверхні. Навпаки, зазначає С. А. Подолинський, сучасний робітник, що керує машиною, дуже мало напружує свої м'язи у порівнянні з корисним результатом своєї праці у плані збільшення загального запасу енергії. Значно меншою стає доля корисної праці у первісної людини при виготовленні різних знарядь. Таким шляхом зберігається частина енергії, яка перерозподіляється людиною при будівництві житла, шитті одягу або взуття, полюванні, рибній ловлі тощо. Завдяки цьому переконанню у людини з'являється вільний час і запас сил, які були використані на різні удосконалення. В результаті зростання продуктивності праці збільшувалося накопичення і зберігання енергії від перерозподілу. Першою працею такого роду було приручення тварин, розведення і охорона стад, систематичне знищення хижаків і т. п. Надлишок свійських тварин обмежив людей на дея-

кий час від крайньої потреби, дав їм відпочинок, покликавши до життя підприємство і розумовий розвиток. Успішне проведення чисельних і різноманітних спостережень і досліджень передувало всезагальному поширенню землеробства.

Тільки тут вперше, відзначає С. А. Подолинський, ми зустрічаємося з працею такого роду, де справедливості нашого визначення праці вже не ховається за різними побічними обставинами, а чітко виступає на перший план. Автор статті наводить такий приклад. Десятина дикого степу або лісу без втручання людини надає щорічно велику кількість корисного матеріалу; людина прикладає до неї свою працю, і відразу продуктивність десятини зростає у 10, 20 і більше разів. Звичайно, людина не створює матерію, не створює вона енергію. Матеріал вже знаходиться у нашій десятині землі, у засіяному зерні і в атмосфері, а вся енергія отримується від Сонця. Але завдяки прикладеній людській праці десятина землі зберігає в рослинності додаткову кількість енергії. Землеробство виснажує ґрунт тільки тоді, робить висновок С. А. Подолинський, коли воно ведеться нерозумно, хижачьким способом. Навпаки, в удосконаленому господарстві земля дає найбільші врожаї тільки там, де землеробство є вже давно, наприклад в Англії, Франції, Єгипті, Китаї, Японії. Значить, правильне землеробство є найкращим представником корисної праці, тобто роботи, яка збільшує збереження сонячної енергії на земній поверхні.

У шостому розділі статті С. А. Подолинський досліджує походження здатності до роботи в організмі людини. Він зазначає, що уся механічна робота в організмі тварин і людини залежить від енергії їжі, яка, насичуючись хімічною сподібністю кисню, що вдихається, переходить в теплоту, а частина останньої перетворюється у механічну роботу. Теплота, яка виробляється в організмі людини, крім зовнішньої механічної роботи, йде ще на внутрішній кругообіг, рух кишківника, на підтримку постійної температури, на випаровування води і т. д. Тому тільки невелика частина теплоти може перетворюватися у зовнішню механічну роботу, або у працю, якщо ця зовнішня робота буде мати результатом збільшення енергії на земній поверхні.

У *сьомому розділі* статті С. А. Подолинський розглядає біологічні основи походження здатності до механічної роботи в тілі людини. Під термічною машиною він розуміє усіяку машину, що має здатність перетворювати частину нижчої, менш перетворюваної енергії у вищу, найбільш перетворювану, тобто у механічну роботу. Звичайно, при порівнянні працюючої людини з термічною машиною проявляється більша складність людського організму. Ще важливіша відмінність між людиною і будь-якою термічною машиною полягає у багатоманітності дій людини. Не кажучи про психічні функції, механічні рухи людини за своєю чисельністю не можуть бути перевершені будь-яким механізмом. Ця різноманітність і численність рухів людського організму і його рук дають при застосуванні праці можливість одночасно здійснювати в предметах усі ті перестановки, якими зумовлюється збереження зайвих кількостей енергії, наприклад здійснювати всю тривалу серію землеробських та інших робіт. Як показує практика, руки виразніші за органи мови, тому що виявляють у виробництві своєї праці те, що ховають слова. Разом з тим працюючі руки разом із знаряддям праці змушують до розвитку і розумову діяльність.

С. А. Подолинський розглядає людство як «удосконалену машину». Така машина володіє здатністю здійснювати поряд з прямим і оборотний цикл, подаючи самій собі необхідну теплову енергію в пічку і перетворюючи тепло у роботу. Такою здатністю не володіють ні рослини, ні тварини, ні техніка, побудована руками людини. Вони не можуть бути названі «удосконаленими машинами». Тільки людське товариство разом з усім своїм господарством (нивами, стадами, машинами тощо) можна назвати «удосконаленою машиною», яка сама себе конструює, ремонтує, створює нові машини, забезпечуючи врожаєм, годує молодняк великої свійської худоби, виховує і навчає підростаюче покоління. Людська праця повертає суспільству у вигляді їжі, одяжі, житла, задоволення духовних потреб, усю ту суму енергії, яка була витрачена під час їхнього виробництва. Таким чином, тільки людське суспільство здатне перетворювати свою працю

на накопичення енергії, необхідної для задоволення своїх майбутніх духовних потреб, усю ту суму енергії, яка була витрачена під час їхнього виробництва. Таким чином, тільки людське суспільство здатне застосовувати свою працю на накопичення енергії, необхідної для задоволення своїх майбутніх потреб.

У наступному *восьмому розділі* статті С. А. Подолинський розглядає працю як засіб, який слугує для задоволення потреб. Ступінь задоволення потреб наявною кількістю збереженої енергії перебуває у залежності від декількох факторів. Головним з них є: запас перетворюваної енергії в рослинах у початковому періоді дуже полегшив людині перемогу у боротьбі за перемогу за існування з дикими тваринами. Цим запасом людина скористалася не тільки як їжею, а й як матеріалом для будівництва житла, для виготовлення знарядь праці і зброї, як паливом. Уміння користуватися вогнем, тобто сонячною енергією, збереженою рослинами, допомогло людині отримати перші і найважливіші перемоги. Тварини могли протиставити людині в боротьбі з нею тільки енергію свого тіла, яка підтримувалася їжею, здобутою немалою працею. І в умовах всезагальної конкуренції. Людина, слабша від природи, використовувала проти них цілий набір ще досить примітивних знарядь, але навіть вони мали більший запас живої сили, ніж могутні м'язи печерного ведмеда або гострі кігті королівського тигра. Перші ступені людської винахідливості зводились до концентрації певного запасу енергії в найменшому просторі. Цей процес все зростаючої концентрації енергії характеризує собою і подальший хід науково-технічного прогресу (поява вибухових речовин, двигунів внутрішнього згоряння тощо). Сконцентрована в малому обсязі енергія, звільняючись, дає могутчі ефекти, і з цим процесом свідомої концентрації енергії людиною починає діяти інший — боротьба за економію часу.

Достеменно відомо, що чисельність людей перебуває у прямій залежності від величини наявної енергії. Мисливські і скотарські племена ніколи не були достатньо багаточисельними. Тільки після початку землеробства починається і швидке зростання населення, відзначає

С. А. Подолинський. Щоб зрозуміти вплив корисної праці на збільшення енергії і на зростання чисельності населення, необхідно з'ясувати сутність праці і її здатність задовольняти потребам. Звичайно, праця не створює речовину. Її продуктивність полягає тільки у приєднанні до речовини чогось, також не створеного працею. Це щось, робить висновок С. А. Подолинський, і є перетворювана енергія, споживання якої з допомогою праці задовольняє наші потреби.

Окрім праці, на земній поверхні накопичуються відомі кількості енергії, які можуть задовольняти деякі потреби людини. Але давно стало зрозумілим, що ці запаси незначні у порівнянні з тими, які дістаються працею. Відомий англійський економіст Дж. Стюарт писав, що звичайні виробництва Землі, будучи надані Землею лише в невеликій кількості і абсолютно незалежно від людини, нагадують собою невелику суму грошей, яка дається молодій людині з тим, щоб сприяти її становленню на життєвому шляху і дати їй можливість почати будь-яке промислове підприємство, за допомогою якої вона повинна постаратися створити самою своє власне щастя. Таким чином, звичайні виробництва не в змозі задовольнити повністю усі потреби людей, чисельність яких постійно зростає на обмеженій розмірами і ресурсами планеті. Для того щоб задовольнити їх, потрібно збільшити кількість цих виробництв. Засобом для цього служить тільки корисна праця, вважає С. А. Подолинський.

Ми сьогодні можемо вважати, що з розвитком людини ускладнюється її моральне і розумове життя, зростає і кількість праці, яка задовольняє ці потреби. Наприклад, така моральна потреба, як співчуття, у перші періоди існування людини майже не впливала на кількість праці. Сьогодні, не кажучи про організацію благодійності, співчуття відіграє дуже важливу роль в деяких соціально-політичних рухах.

Кількість праці, спрямована на благодійність, постійно зростає. Те ж саме ми можемо сказати про потреби в науковому знанні. Забезпечення цієї сторони людського життя, яка не зумовила жодної праці у первісної людини, веде сьогодні у багатьох країнах до побудови університетів з їхніми лабораторіями, до організації наукових

експедицій і взагалі до значного зростання споживання праці. Звідси слід зробити висновок, що з розвитком людства зростає роль праці в задоволенні потреб.

У дев'ятому розділі своєї статті С. А. Подолинський аналізує різні види праці та їхній стосунок до перерозподілу енергії. Він починає з розгляду рибної ловлі і відзначає, що ці види праці тільки змінюють напрям обміну енергії, але не збільшують його кількісно. Однак тут необхідно враховувати ту обставину, що психічна робота, яка здійснюється в голові людини під впливом гарного харчування, відрізняється від психічної роботи, яка здійснюється у тварин, які є їжею для людини. Працюючий мозок людини забезпечує напрям його практичної діяльності, внаслідок якого додаткова кількість сонячної енергії залучається до обміну на земній поверхні. Власне ця обставина і зумовила перемогу людини над дикими тваринами.

Далі С. А. Подолинський наводить приклади щодо стосунку різних видів праці до перерозподілу енергії. Ці приклади дозволили вченому дійти висновку, що усі виробництва добувної і переробної промисловості споживають відому кількість перетворюваної енергії. Усі вони прямо або опосередковано повертають це споживання з надлишком, шляхом збільшення обміну енергії і використовувати її з більшою вигодою на різних виробництвах. Такий звичайний процес праці. Людська праця утримує на земній поверхні і використовує перетворену сонячну енергію більш тривалий час, ніж це було б без неї.

Десятий розділ статті С. А. Подолинського присвячений аналізу праці, спрямованої на виробництво механічної роботи. Сюди автор відносить роботу свійських тварин і машин. Робота свійських тварин є частиною енергії тієї їжі, яку споживають ці тварини. Тут С. А. Подолинський наводить приклади з виготовлення звичайних знарядь і вказує на збереження енергії з їхньою допомогою. Він розглядає приклади створення складних машин. Автор робить висновок, що вся праця, витрачена на облаштування для уловлювання і використання потоку енергії вітру або води, є корисною працею, яка безпосередньо залучає до бюджету людства нові кількості пе-

ретворюваної енергії. А для свого споживання вона залучає до обміну нові кількості сонячної енергії.

Необхідно сказати ще про один момент, який підкреслює С. А. Подолинський у статті. Він зазначає, що досі задоволення потреб було і є головним стимулом для удосконалення і винаходів. При досить-таки високому загальному рівні задоволення потреб, якого легко досягнути навіть не при збільшенні населення, цей стимул значною мірою перестає діяти, і таким чином звичайне обмеження зростання населення стане однією з головних причин затримки в накопиченні сонячної енергії. Різні види енергії не з однаковою легкістю перетворюються одні в інші, а саме нижчі на вищі. Тому удосконалення людського життя має відбуватися шляхом кількісного збільшення енергетичного бюджету кожної людини, а не тільки шляхом якісного перетворення нижчих форм енергії на вищі. Останнє можливе тільки в дуже обмеженій мірі, значно меншій, ніж кількісне накопичення.

С. А. Подолинський робить висновок, що тільки суспільство з бажанням до швидкого накопичення енергії може швидко йти вперед. Застій в даному випадку майже рівнозначний перерозподілу накопиченої енергії, адже суспільне життя без розвитку втрачає усіляку цінність і всякий зміст існування. Ось чому будь-яке бажання до обмеження населення ми повинні вважати рівнозначним небажаному перерозподілу енергії.

Стаття С. А. Подолинського завершується «Загальними висновками» (*дванадцятий розділ*), в якому підкреслюються підсумки при подальшому дослідженні зв'язків між працею людини і перерозподілом енергії на земній поверхні.

Завершити нашу статтю ми прагнемо висловлюванням В. С. Чеснокова, біографа С. А. Подолинського, який найкраще відзначив роль С. А. Подолинського в енергетичному трактуванні еволюції природи і суспільства. Він пише: «Необхідно нагадати читачеві, що свою основну природничо-наукову працю «Праця людини та її стосунок до розподілу енергії» С. А. Подолинський опублікував у 1880 р. Тоді йому ще не було навіть 30 років. Ось чому в статті ще не зустрі-

чаються такі поняття, як хлорофіл і фотосинтез, екологія і біосфера, автотрофи і гетеротрофи, біоценоз і біогеоценоз, біогеохімічні цикли. Ці поняття перебували в стадії свого становлення. Однак принцип всеєдності С. А. Подолинського став загальнометодичною передумовою сучасних понять біоценозу, біогеоценозу і біогеохімічних циклів, що набули свого значення не тільки як орієнтири наукового пізнання, а й як нормативні принципи, які зобов'язують поважати крик цілісність світобудови. На жаль, доля дозволила молодому вченому С. А. Подолинському творчо попрацювати всього лише пару років, і він не встигнув повернутися, як планував, до розглядуваних у статті проблем і, мабуть, подарувати світові нові, новаторські ідеї, які розвивали вчення про біосферу» [8, С. 100].

І далі: «У широкій літературі про енергетичну роль живої речовини і енергетичному підході ім'я С. А. Подолинського поступово стало виходити з небуття тільки після опублікування робіт В. І. Вернадського — і це незважаючи на пряме надихання його ідеями. Сьогодні стало зрозумілим, що С. А. Подолинський був одним з видатних і наймолодшим представником вітчизняної традиції у природознавстві, яку сьогодні пов'язують з іменем В. І. Вернадського. С. А. Подолинському характерний широкий системний погляд на природничу історію. Він зробив суттєвий внесок у природознавство і суспільствознавство та здійснив значний вплив на формування вчення про біосферу В. І. Вернадського.

Ідеї С. А. Подолинського, викладені в його статті «Праця людини та її стосунок до розподілу енергії» свідчать не тільки про пріоритет вітчизняної науки з багатьох питань природознавства, актуальність яких усвідомлюється тільки в наш час, а й зберігають методологічну цінність у світовому контексті [10—13]. У праці С. А. Подолинського читач знайде приклад постановки і підходу до вирішення цікавої і потрібної проблеми в науковій сфері, які характерні для видатних і оригінальних вчених.

Найбільш важливим є відкриття С. А. Подолинським про те, що розвиток живих організмів на земній поверхні відбувається під впливом сонячної енергії. Ось чому ім'я С. А. Подолин-

ського заслужено згадується серед попередників В. І. Вернадського, який займався вивченням енергетики живої речовини і становленням вчення про біосферу і ноосферу.

Автори висловлюють подяку доктору фіз.-мат. наук В. А. Шендеровському і доктору фіз.-мат. наук І. Б. Вавиловій за корисні зауваження і поради у підготовці до друку нашої статті.

ЛІТЕРАТУРА

1. Вернадский В. И. *Очерки геохимии*. Москва: Наука, 1983. 422 с.
2. Вернадский В. И. *Труды по истории науки в России*. Москва: Наука, 1988. 467 с.
3. Злупко С. М. *Сергій Андрійович Подолінський — вчений, мислитель, революціонер*. Львів: Каменяр. 1990. 192 с.
4. Мирзоян Э. Н. Из истории научных понятий. *Бюл. Комиссии по разработке научного наследия академика В. И. Вернадского*. 2003. № 17. С. 22—44.
5. Пилипчук О. Я., Стрелко О. Г., Коробченко А. А., Пилипчук О. О. Альфред Рассел Уоллес про гармонію у Всесвіті (До 120-річчя його праці «Місце людини у Всесвіті»). *Космічна наука і технологія*. 2022. **28**, № 2. С. 61—68. doi:10.15407/knit2022.02.061
6. Пилипчук О. Я., Стрелко О. Г., Пилипчук О. О. Академік В. І. Вернадський про споконвічність життя в космосі (До 100-річчя його праці «Початок і вічність життя»). *Космічна наука і технологія*. 2021. **27**, № 2. С. 85—92. doi:10.15407/knit2021.02.085
7. Подолінський М. А. Труд человека и его отношение к распределению энергии. *Слово*. 1880. № 4/5. С. 135—211.
8. Чесноков В. С. *Сергей Андреевич Подолінський: 1850—1891*. Отв. ред. И. И. Мочалов. Изд. 2-е, доп. Москва: Наука, 2006. 316 с.
9. Duplenko Y., Gamaliia K. Ukrainian naturalist and economist Serhii Podolinsky and his role in the formation of the noosphere concept. *Acta Baltica Historiae Et Philosophiae Scientiarum*. 2014. **2**, № 2. P. 43—54. doi:10.11590/abhps.2014.2.03
10. Foster J. B., Burkett P. Ecological economics and classical marxism: The «Podolinsky business» reconsidered. *Organization and Environment*. 2004. **17**, № 1. P. 32—60. doi:10.1177/1086026603262091
11. Nasution M. K. The birth of a science. *History of Science and Technology*. 2020. **10**, № 2. P. 315—338. <https://doi.org/10.32703/2415-7422-2020-10-2-315-338>
12. Oh J.-Y., Han H. Understanding mathematical abstraction in the formularization of Galileo's law. *History of Science and Technology*. 2022, **12**, № 1. P. 55—68. <https://doi.org/10.32703/2415-7422-2022-12-1-55-68>
13. Parys W. Labour values and energy values: Some developments on the common substance of value since 1867. *Eur. J. History of Economic Thought*. 2018. **25**, № 5. P. 1052—1080. doi:10.1080/09672567.2018.1523939

REFERENCES

1. Vernadskyi V. Y. (1983). *Essays of geochemistry*. Moscow: Nauka (Science), 422 p. [in Russian].
2. Vernadskyi V. Y. (1988). *Papers on the history of science in Russia*. Moscow: Nauka, 467 p. [in Russian].
3. Zlupko S. M. (1990). *Serhii Andriyovych Podolynskiy is a scientist, thinker, revolutionary*. Lviv: Kamenyar, 192 p. [in Ukrainian].
4. Myrzoian E. N. (2003). From the history of scientific concepts. *Bull. Commission for the Development of the Scientific Heritage of Academician V. I. Vernadsky*, № 17, 22—44 [in Russian].
5. Pylypchuk O. Ya., Strelko O. H., Korobchenko A.A., Pylypchuk O. O. (2022). Alfred Russel Wallace about harmony in the Universe (To the 120th anniversary of his work “Man’s Place in the Universe”). *Space Science and Technology*, **28**, № 2, 61—68. doi:10.15407/knit2022.02.061 [in Ukrainian].
6. Pylypchuk O. Ya., Strelko O. H., Pylypchuk O. O. (2021). Academician V. I. Vernadsky about the originality of life in space (To the 100th anniversary of his work “The Beginning and Eternity of Life”). *Space Science and Technology*, **27**, № 2, 85—92. doi:10.15407/knit2021.02.085 [in Ukrainian].
7. Podolynskiy M. A. (1880). Human labor and its relation to the distribution of energy. *Word*, № 4/5, 135—211 [in Russian].
8. Chesnokov V. S. (2006). *Sergey Andreevich Podolinsky: 1850—1891*. Moscow: Nauka, 316 p. [in Russian].
9. Duplenko Y., Gamaliia K. (2014). Ukrainian naturalist and economist Serhii Podolinsky and his role in the formation of the noosphere concept. *Acta Baltica Historiae Et Philosophiae Scientiarum*, **2**, № 2, 43—54. doi:10.11590/abhps.2014.2.03
10. Foster J. B., Burkett P. (2004). Ecological economics and classical marxism: The “Podolinsky business” reconsidered. *Organization and Environment*. **17**, № 1, 32—60. doi:10.1177/1086026603262091

11. Nasution M. K. (2020). The birth of a science. *History of Science and Technology*, **10**, № 2, 315—338. <https://doi.org/10.32703/2415-7422-2020-10-2-315-338>
12. Oh J.-Y., Han H. (2022). Understanding mathematical abstraction in the formularization of Galileo's law. *History of Science and Technology*, **12**, № 1, 55—68. <https://doi.org/10.32703/2415-7422-2022-12-1-55-68>
13. Parys W. (2018). Labour values and energy values: Some developments on the common substance of value since 1867. *Eur. J. History of Economic Thought*, **25**, № 5, 1052—1080. doi:10.1080/09672567.2018.1523939

Стаття надійшла до редакції 27.09.2022

Після доопрацювання 08.11.2022

Прийнято до друку 17.11.2022

Received 27.09.2022

Revised 08.11.2022

Accepted 17.11.2022

О. Я. Пилипчук, Dr. Sci. in Biology, Professor, Head of the Department

E-mail: olegpilipchuk47@gmail.com

О. Г. Стрелко, Dr. Sci. in History, Professor

E-mail: olegstrelko@gmail.com

О. О. Пилипчук, Dr. Sci. in History, assistant professor

E-mail: oksanapilipchuk78@gmail.com

State University of Infrastructure and Technologies 9 Kyrylivska St., Kyiv, 04071, Ukraine

S. A. PODOLINSKYI IN THE ENERGETIC INTERPRETATION OF THE EVOLUTION OF NATURE AND SOCIETY

Serhii Andriyovych Podolynskyi (1850—1891) — a researcher of nature, natural philosopher, doctor, public figure and publicist, lived a short life. Still with the main works of S. A. Podolynskyi is almost unknown to the scientific community. Great Ukrainian scientist V. I. Vernadskyi was inspired by the scientific works and ideas of S. A. Podolynskyi. And the characteristics of S. A. Podolynskyi as a “forgotten scientific innovator”, which was given to him by V. I. Vernadskyi at the beginning of the 20th century, remains largely fair even today.

The article was prepared for the 150th anniversary of the “energy concept” of S. A. Podolynskyi and dedicated to the history of his work “Work and its relationship to the distribution of energy” (1880). A number of issues of the distribution of solar energy in the universe are covered. The data on the value of S. A. Podolynskyi in the energetic interpretation of the development of nature and society. Analysis of each section of the article by S. A. Podolynskyi in the context of the impact of work on the distribution of solar energy on the Earth's surface.

Ideas of S. A. Podolynskyi, presented in his work “Man's work and its attitude to the distribution of energy” testify not only to the priority of domestic science on many issues of natural science, the relevance of which is realized only in our time, but also retain methodological value in the world context. In the work of S. A. Podolynskyi's reader will find an example of the formulation and approach to solving an interesting and necessary problem in the scientific field, which are characteristic of outstanding and original scientists.

The most important is the opening of S. A. Podolynskyi that the development of living organisms on the Earth's surface occurs under the influence of solar energy. That is why the name S. A. Podolynskyi is deservedly mentioned among the predecessors of V. I. Vernadskyi, who studied the energetics of living matter and the formation of the doctrine of the biosphere and noosphere. The importance of the work of S. A. Podolynskyi is considered and its further prospects in the development of scientific research on the use of energy.

Keywords: S. A. Podolynskyi, solar energy, Universe, distribution of energy, work.



«Дослідження Землі з космосу було сутністю його наукового життя» — слово пам'яті про професора Вадима Івановича Лялька, академіка НАН України

24 вересня 2022 року вітчизняна наука зазнала непоправної втрати — пішов з життя відомий вчений в галузі аерокосмічних досліджень Землі, геології, гідрогеології, геотермії, геоecології, лауреат Державних премій України в галузі науки і техніки, премії ім. В. І. Вернадського АН України, Заслужений діяч науки і техніки України, почесний директор Наукового центру аерокосмічних досліджень Землі ІГН НАН України, академік НАН України **Вадим Іванович ЛЯЛЬКО**.

Вадим Іванович зробив суттєвий внесок у світову геологічну науку. Діапазон його наукових інтересів охоплює широкий спектр напрямків дослідження Землі: від гідрогеології, геоecології, геотермії до вивчення Землі дистанційними методами. У фундаментальних наукових працях Вадим Іванович обґрунтував новий напрям у науках про Землю — енергомасообмін у геосисте-

мах, який розвивається у форматі оригінальної наукової школи. Вона розглядає енергомасообмін у геосистемах, його вплив на дуже чутливі до дії різних природних й антропогенних факторів фізико-хімічні і біологічні механізми, які відповідають за формування спектрального відгуку природних об'єктів.

Після закінчення у 1955 р. з відзнакою навчання на геологічному факультеті Київського державного університету ім. Т. Г. Шевченка він пов'язав усе своє життя з Академією наук. До 1992 р. працював в Інституті геологічних наук АН УРСР, де пройшов шлях від інженера відділу гідрогеології до завідувача відділу тепломасопереносу в земній корі.

У 1986 році Вадим Іванович, як завідувач відділу тепломасопереносу в земній корі Інституту геологічних наук, був ініціатором створення На-

укової ради АН УРСР з дистанційного зондування Землі (ДЗЗ).

З 1992 року розпочався новий етап у житті Вадима Івановича. Він очолив Центр аерокосмічних досліджень Землі ІГН НАН України, створений з ініціативи Президента НАН України академіка НАН України Б. Є. Патона. Центр поступово став авторитетною, зноюю за кордонами нашої держави організацією у галузі аерокосмічних досліджень Землі. Вийшло друком чимало книг. Фахівці Центру брали участь у спільних проектах із зарубіжними науковцями у рамках програми «Інтеркосмос», працювали над реалізацією завдань Національних космічних програм України, успішно виборювали наукові гранти від міжнародних організацій.

Вадим Іванович досяг значних успіхів у теоретико-методичному обґрунтуванні і випробуванні у виробничих умовах нових методів аерокосмічного землезнавства. Це сприяло реалізації найважливіших і актуальних завдань, що можуть ефективно й економічно вирішуватися для України із застосуванням інформації ДЗЗ, а саме: забезпечення роботи космічного блоку системи екологічного моніторингу країни й окремих регіонів, прогнозування врожайності сільськогосподарських культур і пожежонебезпечності лісів, пошуки нафтогазових покладів, періодична оцінка стану міських агломерацій (зсуви, підтоплення тощо) та якості земель (у процесі земельної реформи); вивчення сучасних геодинамічних процесів під час реструктуризації вугільних шахт, оцінка стану та прогнозування заходів щодо охорони рослинних екосистем з метою мінімізації негативного впливу змін клімату тощо.

Вадим Іванович підготував і опублікував за своє життя понад 600 наукових праць, з них 30 монографій. Серед його учнів багато кандидатів і докторів наук.

В. І. Лялька був видатним організатором і педагогом. З 1986 року він — голова Наукової ради НАН України з вивчення природних ресурсів

дистанційними методами. З 1996 року до останнього часу був головою спеціалізованої вченої ради при ЦАКДЗ ІГН НАН України з захисту докторських та кандидатських дисертацій. Він був головним редактором електронного періодичного видання «Український журнал дистанційного зондування Землі», членом редколегій журналів «Космічна наука і технологія» та «Геологічного журналу»; науковим керівником проекту дослідження природних ресурсів аерокосмічними засобами у межах Національної космічної програми України. Вадим Іванович був координатором Відділення наук про Землю у вітчизняному проекті — частині Міжнародної програми «Глобальна система систем обстеження Землі» (GEOSS), у Європейській програмі «Глобальний моніторинг для навколишнього середовища та безпеки» (GMES). В. І. Лялька брав активну участь у міжнародних наукових конференціях, був обраний до складу Міжнародної академії астронавтики (2001 р.).

Заслуги Вадима Івановича перед вітчизняною наукою і виробництвом були відзначені Державними нагородами. Він є лауреатом Державних премій України в галузі науки і техніки (1989, 2004 рр.), премії ім. В. І. Вернадського АН України (1986 р.), Заслуженим діячем науки і техніки України (1997 р.). Його удостоєно орденом «За заслуги» II та III ступеня, Почесною Грамотою Верховної Ради України, почесними відзнаками «За наукові досягнення» НАН України, «За заслуги в розвідці надр» Геологічної служби України, «Почесний працівник та ветеран космічної галузі України» Національного космічного агентства України, «Золотий знак» Спілки геологів України та ін.

З великим смутком і болем ми, члени редколегії та редакції журналу «Космічна наука і технологія», зустріли звістку про смерть Вадима Івановича Лялька, світла пам'ять про якого назавжди залишиться в наших серцях.

Ангельський О. В. — див. Клецонок В. В.
Андрєєв О. А. — див. Голубаєв О. В.

Беспалко І. А., Греков Л. Д., Пекарєв Д. В., Федорчук Д. Л. Концепція інформаційної системи для забезпечення моніторингу космічного простору з метою підвищення воєнної безпеки. *Космічна наука і технологія*. 2022. **28**, № 4. С. 3—17.

Білінський А. І. — див. Вовчик Є. Б.
Білоусов К. Г., Нечипорук М. В., Хорошилов В. С., Свиначенко Д. М., Мозговий Д. К., Попель В. М. Метод автоматизованої корекції приладових спотворень на багато-спектральних супутникових знімках «Ландсат-7». *Космічна наука і технологія*. 2022. **28**, № 3. С. 17—28.

Борисов А. А. — див. Пастухов А. О.
Борисова Т. О. — див. Пастухов А. О.
Булашенко А. В. — див. Пільтяй С. І.
Булашенко О. В. — див. Пільтяй С. І.
Буромський М. І. — див. Клецонок В. В.
Бушуєв Ф. І. — див. Голубаєв О. В.

Відьмаченко А. П. — див. Голубаєв О. В.
Вірун Н. В. — див. Вовчик Є. Б.
Вовчик Є. Б., Білінський А. І., Мартинюк-Лотоцький К. П., Вірун Н. В., Підстригач І. Я., Ногац Р. Т. Оптичні спостереження штучних космічних об'єктів у Львівській астрономічній обсерваторії. *Космічна наука і технологія*. 2022. **28**, № 2. С. 54—60.

Гайдачук О. В., Кондратьєв А. В., Набокїна Т. П. Оптимізація тиску і часу формування композитних виробів при температурі мінімальної в'язкості сполучного. *Космічна наука і технологія*. 2022. **28**, № 2. С. 3—13.

Голубаєв О. В., Горбаньов Ю. М., Шульга О. В., Андрєєв О. А., Бушуєв Ф. І., Відьмаченко А. П., Грудинін Б. О., Жилєєв Б. Є., Калюжний М. П., Козак П. М., Куліченко М. О., Малиновський Є. В., Мозгова А. М., Савчук С. Г., Стеклов О. Ф., Сумарук Ю. П., Янків-Вітковська Л. М. Створення Української метеорної спостережної мережі: інструменти, методи обробки, спостережні можливості. *Космічна наука і технологія*. 2022. **28**, № 4. С. 39—70.

Горбаньов Ю. М. — див. Голубаєв О. В.
Горбаньов Ю. М. — див. Клецонок В. В.
Горєлов Б. М. — див. Гусарова І. О.
Греков Л. Д. — див. Беспалко І. А.
Грудинін Б. О. — див. Голубаєв О. В.

Гусарова І. О., Потапов О. М., Горєлов Б. М., Манько Т. А., Фролов Г. О. Композиційні термостійкі матеріали для багатифункціонального покриття. *Космічна наука і технологія*. 2022. **28**, № 1. С. 43—50.

Гурова А. М. — див. Малишева Н. Р.
До 70-річчя О. П. Федорова, доктора фізико-математичних наук, члена-кореспондента НАН України. *Космічна наука і технологія*. 2022. **28**, № 5. С. 81—82.

Дорофєєв А. В. — див. Ниркова Л. І.
«Дослідження Землі з космосу було сутністю його наукового життя» — слово пам'яті про проф. Вадима Івановича Лялька, академіка НАН України. *Космічна наука і технологія*. 2022. **28**, № 6. С. 85—86.

Ємельянов М. О., Шелестов А. Ю., Яїлімова Г. О., Шуміло Л. Л. Вплив зміни клімату на площі основних сільськогосподарських культур. *Космічна наука і технологія*. 2022. **28**, № 2. С. 30—38.

Єпішев В. П., Кудак В. І., Мотрунич І. І., Періг В. М., Найбауєр І. Ф., Присяжний В. І. Визначення орієнтації штучного супутника Землі у випадку дифузного розсіювання світла його поверхнею. *Космічна наука і технологія*. 2022. **28**, № 1. С. 61—69.

Жданко Є. Г. — див. Luo Y.
Жилєєв Б. Є. — див. Голубаєв О. В.
Жук І. Т. — див. Федоренко А. К.

Зазуляк П. М. — див. Согор А. Р.
Зазуляк П. М. — див. Фис М. М.
Захаров І. Г., Чорногор Л. Ф. Глобальні та локальні ефекти сейсмічної активності в іоносфері. *Космічна наука і технологія*. 2022. **28**, № 6. С. 12—24.

Ісмаїлов М. Б. — див. Мейірбеков М. Н.

Калиновська Л. М. — див. Пастухов А. О.
Калюжний М. П. — див. Голубаєв О. В.
Карбовський В. Л. — див. Клецонок В. В.
Кашуба В. І. — див. Клецонок В. В.
Кімаковський С. Р. — див. Клецонок В. В.
Клецонок В. В., Карбовський В. Л., Буромський М. І., Лашко М. В., Горбаньов Ю. М., Кашуба В. І., Кімаковський С. Р., Шавловський В. І., Ангельський О. В., Цехмейстренко В. С., Мишевський М. М., Ревун А. В. Покриття зір малими планетами Сонячної системи: стан спостере-

- режних програм в Україні. *Космічна наука і технологія*. 2022. **28**, № 5. С. 56–66.
- Козак П. М. — див. Голубаєв О. В.
- Козіс К. В. — див. Мейірбеков М. Н.
- Кондратьєв А. В. — див. Гайдачук О. В.
- Корепанов В. Є. — див. Лізунов Г. В.
- Коробченко А. А. — див. Пилипчук О. Я. (а)
- Крисанова Н. В. — див. Пастухов А. О.
- Крючков Є. І. — див. Федоренко А. К.
- Кудак В. І. — див. Єпішев В. П.
- Куліченко М. О. — див. Голубаєв О. В.
- Лабур Т. М. — див. Ниркова Л. І.
- Лашко М. В. — див. Клецонок В. В.
- Лізунов Г. В., Корепанов В. Є., Лукенюк А. А., П'янкoва О. В., Федоров О. П. Космічний проєкт «Іоносат-Мікро»: готовність до реалізації. *Космічна наука і технологія*. 2022. **28**, № 6. С. 3–11.
- Лукенюк А. А. — див. Лізунов Г. В.
- Лялько В. І., Попов М. О., Седлєрова О. В., Хижняк А. В. Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України: шлях довжиною 30 років. *Космічна наука і технологія*. 2022. **28**, № 3. С. 29–42.
- Малиновський Є. В. — див. Голубаєв О. В.
- Малишева Н. Р., Гурова А. М. Довгострокова сталість космічної діяльності: нові виклики перед міжнародним і національним космічним правом. *Космічна наука і технологія*. 2022. **28**, № 6. С. 63–73.
- Мамрай С. А. — див. Сухов П. П.
- Манько Т. А. — див. Гусарова І. О.
- Манько Т. А. — див. Мейірбеков М. Н.
- Мартинюк-Лотоцький К. П. — див. Вовчик Є. Б.
- Мейірбеков М. Н., Ісмаїлов М. Б., Манько Т. А., Козіс К. В. Дослідження впливу каучуків на міцнісні властивості вуглепластику. *Космічна наука і технологія*. 2022. **28**, № 5. С. 67–74.
- Мишевський М. М. — див. Клецонок В. В.
- Мозгова А. М. — див. Голубаєв О. В.
- Мозговий Д. К. — див. Білоусов К. Г.
- Мотрунич І. І. — див. Єпішев В. П.
- Набокiна Т. П. — див. Гайдачук О. В.
- Назаренко О. П. — див. Ниркова Л. І.
- Назарова А. Г. — див. Пастухов А. О.
- Найбауер І. Ф. — див. Єпішев В. П.
- Нечипорук М. В. — див. Білоусов К. Г.
- Ниркова Л. І., Лабур Т. М., Шевцов Є. І., Назаренко О. П., Дорофєєв А. В., Осадчук С. О., Яворська М. Р., Поляцький А. Г., Федорчук В. Є. Комплекс властивостей зварного з'єднання сплаву 2219 у стані Т62 в умовах моделювання експлуатації. *Космічна наука і технологія*. 2022. **28**, № 2. С. 14–29.
- Нігрєєва О. О. Міжнародно-правовий режим космічного простору: між *res communis* та *res nullius*. *Космічна наука і технологія*. 2022. **28**, № 1. С. 23–42.
- Ногач Р. Т. — див. Вовчик Є. Б.
- Осадчук С. О. — див. Ниркова Л. І.
- Павловський О. Л. — див. Сухов П. П.
- Пастухов А. О., Крисанова Н. В., Позднякова Н. Г., Борисов А. А., Сівко Р. В., Назарова А. Г., Калиновська Л. М., Борисова Т. О. Розроблення підходів нейропротекції при довготривалих космічних місіях. *Космічна наука і технологія*. 2022. **28**, № 6. С. 52–62.
- Пекареєв Д. В. — див. Беспалко І. А.
- Періг В. М. — див. Єпішев В. П.
- Петрик І. А. — див. Ющенко К. А.
- Пилипчук О. О. — див. Пилипчук О. Я. (а)
- Пилипчук О. О. — див. Пилипчук О. Я. (б)
- Пилипчук О. Я., Стрелко О. Г., Коробченко А. А., Пилипчук О. О. Альфред Рассел Уоллес про гармонію у Всесвіті (До 120-річчя його праці «Місце людини у Всесвіті»). *Космічна наука і технологія*. 2022. **28**, № 2. С. 61–68. (а)
- Пилипчук О. Я., Стрелко О. Г., Пилипчук О. О. С. А. Подолінський в енергетичному трактуванні еволюції природи і суспільства. *Космічна наука і технологія*. 2022. **28**, № 6. С. 74–84. (б)
- Підстригач І. Я. — див. Вовчик Є. Б.
- Пільтяй С. І., Булашенко А. В., Поліщук А. В., Булашенко О. В. Хвилевідний НВЧ-поляризатор для антен супутникового зв'язку з коловою поляризацією. *Космічна наука і технологія*. 2022. **28**, № 3. С. 43–61.
- Позднякова Н. Г. — див. Пастухов А. О.
- Покляцький А. Г. — див. Ниркова Л. І.
- Поліщук А. В. — див. Пільтяй С. І.
- Попель В. М. — див. Білоусов К. Г.
- Попов М. О. — див. Лялько В. І.
- Потапов О. М. — див. Гусарова І. О.
- Поштаренко Ю. А., Рассамакін Б. М., Рогачов В. А., Хомініч В. І., Шевченко М. Д. Засоби вимірювання теплових потоків при термовакuumних дослідженнях та випробуваннях виробів космічної техніки. *Космічна наука і технологія*. 2022. **28**, № 1. С. 51–60.
- Присяжний В. І. — див. Єпішев В. П.
- П'янкoва О. В. — див. Лізунов Г. В.
- Рассамакін Б. М. — див. Поштаренко Ю. А.
- Ревун А. В. — див. Клецонок В. В.
- Рогачов В. А. — див. Поштаренко Ю. А.
- Савчук С. Г. — див. Голубаєв О. В.
- Свинаренко Д. М. — див. Білоусов К. Г.
- Седлєрова О. В. — див. Лялько В. І.
- Сівко Р. В. — див. Пастухов А. О.

Согор А. Р., Зазуляк П. М. Картографування екологічного забруднення повітря міста Львів. *Космічна наука і технологія*. 2022. **28**, № 3. С. 86—91.

Согор А. Р. — див. Фис М. М.

Стеклов О. Ф. — див. Голубаєв О. В.

Стрелко О. Г. — див. Пилипчук О. Я. (а)

Стрелко О. Г. — див. Пилипчук О. Я. (б)

Сумарук Ю. П. — див. Голубаєв О. В.

Сухов К. П. — див. Сухов П. П.

Сухов П. П., Сухов К. П., Павловский О. Л., Мамрай С. А. Фотометричний спосіб визначення деградації поверхні геостационарного об'єкта. *Космічна наука і технологія*. 2022. **28**, № 5. С. 75—80.

Федоренко А. К., Крючков Є. І., Черемних О. К., Жук І. Т. Хвильові збурення атмосфери у просторово неоднорідній течії. *Космічна наука і технологія*. 2022. **28**, № 6. С. 25—33.

Федоров О. П. — див. Лізунов Г. В.

Федорчук В. Є. — див. Ниркова Л. І.

Федорчук Д. Л. — див. Беспалко І. А.

Фис М. М., Зазуляк П. М., Согор А. Р. Потенціал сили тяжіння та його складова відцентрової сили всередині еліпсоїдальної планети. *Космічна наука і технологія*. 2022. **28**, № 4. С. 71—77.

Фролов Г. О. — див. Гусарова І. О.

Хижняк А. В. — див. Лялько В. І.

Хомініч В. І. — див. Поштаренко Ю. А.

Хорошилов В. С. — див. Білоусов К. Г.

Хрущов Г. Д. — див. Ющенко К. А.

Цехмейстренко В. С. — див. Клецонок В. В.

Чигилейчик С. Л. — див. Ющенко К. А.

Черемних О. К. — див. Федоренко А. К.

Чорногор Л. Ф. — див. Захаров І. Г.

Чорногор Л. Ф. — див. Luo Y.

Шавловський В. І. — див. Клецонок В. В.

Шевченко М. Д. — див. Поштаренко Ю. А.

Шевцов Є. І. — див. Ниркова Л. І.

Шелестов А. Ю. — див. Ємельянов М. О.

Шульга О. В. — див. Голубаєв О. В.

Шуміло Л. Л. — див. Ємельянов М. О.

Ющенко К. А., Яровицин О. В., Хрущов Г. Д., Петрик І. А., Чигилейчик С. Л. Дослідження і оптимізація процесу серійного ремонту робочих лопаток авіаційного газотурбінного двигуна Д-18Т мікроплазмовим порошковим наплавленням. *Космічна наука і технологія*. 2022. **28**, № 3. С. 3—16.

Яворська М. Р. — див. Ниркова Л. І.

Яйлимова Г. О. — див. Ємельянов М. О.

Янків-Вітковська Л. М. — див. Голубаєв О. В.

Яровицин О. В. — див. Ющенко К. А.

Яцків Я. С. З історії космічних досліджень в Україні. 1. Виконання космічних досліджень станом на 1991 р. *Космічна наука і технологія*. 2022. **28**, № 4. С. 78—88.

Akhmetov V. S. — see Khramtsov V.

Azevedo V. — see Orlovska I.

Baburov V. V. — see Gristchak V. Z.

Barh D. — see Orlovska I.

Bashliy I. D. — see Pylypenko O. V.

Ben Bahri O. Impact of Didactic Satellite in Space Maturity Improvement: A Review Paper. 2022. **28**, № 2. С. 39—47.

Bezrukovs V. — see Bushuev F. I.

Bryukhovetsky O. B. — see Bushuev F. I.

Bushuev F. I., Kaliuzhnyi M. P., Kriuchkovskiy V. F., Kulichenko M. O., Shulga O. V., Zhang Z., Bezrukovs V., Malynovskiy Ye. V., Reznichenko O. M., Bryukhovetsky O. B., Tuccari G. Observations of GEO and LEO Satellites: Radio Engineering Means of the Mykolaiv Astronomical Observatory. *Космічна наука і технологія*. 2022. **28**, № 2. С. 48—53.

de Vera J.-P. — see Orlovska I.

di Cesare A. — see Orlovska I.

Dmytrenko A. M. — see Khramtsov V.

Dobrycheva D. V. — see Khramtsov V.

Dobrycheva D. V. — see Vavilova I. B.

Dyachenko N. M. — see Gristchak V. Z.

Elyiv A. A. — see Khramtsov V.

Elyiv A. A. — see Vavilova I. B.

Göes-Neto A. — see Orlovska I.

Gristchak V. Z., Hryshchak D. V., Dyachenko N. M., Baburov V. V. The influence of the Gaussian curvature sign of the compound shell structure's middle surface on local and overall buckling under combined loading. *Космічна наука і технологія*. 2022. **28**, № 4. С. 31—38.

Gutnyk M. V. — see Zhurilo D. Yu.

Hryshchak D. V. — see Gristchak V. Z.

Kaliuzhnyi M. P. — see Bushuev F. I.

Khoroshylov S. V. — see Redka M. O.

Khramtsov V., Vavilova I. B., Dobrycheva D. V., Vasylenko M. Yu., Melnyk O. V., Elyiv A. A., Akhmetov V. S., Dmytrenko A. M. Machine learning technique for morphological classification of galaxies from the SDSS. III. The CNN image-based inference of detailed features. *Космічна наука і технологія*. 2022. **28**, № 5. С. 27—55.

Khramtsov V. — see Vavilova I. B.

Kozyrovskaya N. — see Orlovska I.

Kriuchkovskiy V. F. — see Bushuev F. I.

Kukharenko O. — see Orlovska I.

Kulichenko M. O. — see Bushuev F. I.

Luo Y., Чорногор Л. Ф., Жданко Є. Г. Іоносферні ефекти ракет, що стартують на фоні геокосмічних бур. *Космічна наука і технологія*. 2022. **28**, № 3. С. 62—85.

- Malynovskiy Ye. V.* — see Bushuev F. I.
Maslova A. I. — see Pirozhenko A. V.
Melnyk O. V. — see Khramtsov V.
Melnyk O. V. — see Vavilova I. B.
Nikolayev O. D. — see Pylypenko O. V.
Orlovska I., Podolich O., Kukhareno O., Zubova G., Reva O., di Cesare A., Góes-Neto A., Azevedo V., Barh D., de Vera J.-P., Kozynovska N. The conceptual approach to the use of post-biotics based on bacterial membrane nanovesicles for prophylaxis of astronauts' health disorders. *Космічна наука і технологія*. 2022. **28**, № 6. С. 34—51.
Pirozhenko A. V., Maslova A. I., Vasyliov V. V. Analytical model of satellite motion in almost circular orbits under the influence of zonal harmonics of geopotential. *Космічна наука і технологія*. 2022. **28**, № 4. С. 18—30.
Podolich O. — see Orlovska I.
Pylypenko O. V., Smolensky D. E., Nikolayev O. D., Bashliy I. D. The approach to numerical simulation of the spatial movement of fluid with the formation of free gas inclusions in propellant tank under space flight conditions. *Космічна наука і технологія*. 2022. **28**, № 5. С. 3—14.
Redka M. O., Khoroshylov S. V. Determination of the force impact of an ion thruster plume on an orbital object via deep learning. *Космічна наука і технологія*. 2022. **28**, № 5. С. 15—26.
Reva O. — see Orlovska I.
Reznichenko O. M. — see Bushuev F. I.
Shulga O. V. — see Bushuev F. I.
Smolensky D. E. — see Pylypenko O. V.
Tuccari G. — see Bushuev F. I.
Vasylenko M. Yu. — see Khramtsov V.
Vasylenko M. Yu. — see Vavilova I. B.
Vasyliov V. V. — see Pirozhenko A. V.
Vavilova I. B., Khramtsov V., Dobrycheva D. V., Vasylenko M. Yu., Elyiv A. A., Melnyk O. V. Machine learning technique for morphological classification of galaxies from SDSS. II. The image-based morphological catalogs of galaxies at $0.02 < z < 0.1$. *Космічна наука і технологія*. 2022. **28**, № 1. С. 3—22.
Vavilova I. B. — see Khramtsov V.
Zhang Z. — see Bushuev F. I.
Zhurilo A. G. — see Zhurilo D. Yu.
Zhurilo D. Yu., Gutnyk M. V., Zhurilo A. G. George Bothezat and his contribution into the world aviation and astronautics. *Космічна наука і технологія*. 2022. **28**, № 1. С. 70—80.
Zubova G. — see Orlovska I.